

Kaksikäämikone redundanttissa taajuusmuuttajakäytössä

Markus Heinonen

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 23.4.2018.

Työn valvoja

Prof. Marko Hinkkanen

Työn ohjaaja

DI Mikko Kostiainen

Tekijä Markus Heinonen

Työn nimi Kaksikämmikone redundanttisessa taajuusmuuttajakäytössä

Koulutusohjelma Automation and Electrical Engineering

Pääaine Electrical Power and Energy Engineering **Pääaineen koodi** ELEC3024

Työn valvoja Prof. Marko Hinkkanen

Työn ohjaaja DI Mikko Kostiainen

Päivämäärä 23.4.2018

Sivumäärä 63

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Redundanttisella monivaihekonekäytöllä voidaan lisätä esimerkiksi propulsiojärjestelmien viansietokykyä. Kaksikämmikone on kuusivaiheinen monivaihekone, jossa on kaksi kolmivaihekäämiryhmää. Käämiryhmien välisen magneettisen kytkkeytymisen seurauksena käämiryhmät indusoivat toisiinsa rippelijännitteen.

Kahden itsenäisen taajuusmuuttajan tiedetään aiheuttavan huomattavasti korkean taajuuden virtayliaaltoja kaksikämmikoneeseen. Tämä johtuu indusoituvan rippelijännitteen aiheuttamasta säätöjen ristikkäiskytkkeytymisestä. Tämä kytkeytyminen on yleensä otettu huomioon monimutkaisilla säätöratkaisulla. Tässä työssä esitetty yksinkertainen menetelmä poistaa säätöjen kytkkeytymisen automaattisesti. Käytettäessä virtaestimaattia säädössä mitatun virran sijaan, taajuusmuuttajat näkevät vain syöttämänsä virran eivätkä huomaa toisen käämiryhmän yliaaltoja.

Mittauksilla osoitettiin, ettei virtaestimoitu erillissäätö aiheuta vääntömomenttirippeliä, ylimääräisiä staattorivirran yliaaltoja eikä ylimääräisiä jännitepiikkejä. Erillissäädöllä ei kuitenkaan voida kompensoida koneen itsensä aiheuttamia matalan taajuuden yliaaltoja. Simuloinneilla todettiin, että kyseisiä yliaaltoja voidaan pienentää jäniteistyksellä, mutta tällöin kasvatetaan käämiryhmien välistä magneettista kytkkeytymistä. Virtaestimoidun erillissäädön virtamallin dynamiikka on heikentynyt johtuen magneettista kytkkeytymistä kuvaavien termien puuttumisesta säädöstä. Virtamallin puutteista ja matalilla nopeuksilla jännitemallin yleisestä heikkoudesta johtuen, erillissäädön dynamiikka kärsii pienillä kierrosnopeuksilla.

Erillissäädön yksinkertaisuus tekee siitä varteenotettavan vaihtoehdon kaksikämmikoneen ohjauksessa. Virtaestimoidun erillissäädön dynamiikka kärsii vain matalilla nopeuksilla ja siten soveltuu hyvin esimerkiksi propulsiokäyttöihin, jotka eivät vaadi hyvää dynamiikkaa alhaisilla nopeuksilla.

Avainsanat sähkökäyttö, monivaihekone, erillissäätö, kytkkeytyminen

Author Markus Heinonen

Title A dual three-phase machine supplied by redundant electric drives

Degree programme Automation and Electrical Engineering

Major Electrical Power and Energy Engineering

Code of major ELEC3024

Supervisor Prof. Marko Hinkkanen

Advisor M.Sc. Mikko Kostiainen

Date 23.4.2018

Number of pages 63

Language Finnish

Abstract

A multiphase machine supplied by redundant electric drives can be used, for example, to increase the fault tolerance of a propulsion system. A dual three-phase machine is a six phase machine with two three-phase winding sets which induce a ripple voltage to each other due to the magnetic coupling between the sets.

Two independent inverters are known to cause considerably high current harmonics in a dual three-phase machine. This is due to the cross-coupling between the separate controls caused by the induced ripple voltage. Cross-coupling is usually taken into account with complex control solutions. This thesis presents a simple solution that automatically eliminates the cross-coupling between the separate controls. Rather than measured current, current estimate is used in the controls. This way the inverters will not notice the current ripple caused by the other winding set but only notices their own supply current.

The measurements show that the suggested method does not cause torque ripple, additional stator current harmonics or stator voltage peaks. However, the separate control cannot compensate for the low frequency harmonics caused by the machine itself. Simulations revealed that these harmonics can be reduced by short pitching. However, short pitching increases the magnetic coupling between the winding sets. The suggested control method suffers from a decrease in the dynamic performance of the current model due to the lack of terms describing the magnetic coupling. Due to the lack of terms in current model, and the general weakness of the voltage model at low speeds, the suggested control method suffers from a decrease in the dynamic performance at low speeds.

The simplicity of the separate control makes it a viable option for controlling a dual three-phase machine. The suggested method suffers from a decrease in the dynamic performance only at low speeds and thus is a feasible alternative for applications, like propulsion systems, that don't require good dynamics at low speeds.

Keywords electric drive, multiphase machine, separate control, coupling

Esipuhe

Professori Marko Hinkkaselle kuuluu iso kiitos kaikista neuvoista ja kritiikistä. Kiitos myös isolle joukolle ABB:n Drives sekä Motors and Generators -yksiköiden henkilökuntaa, jotka olivat kiinnostuneita työstäni ja auttoivat sekä käytännön järjestelyissä että teoreettisissa väännöissä. Erityisesti haluan kiittää ohjaajaani DI Mikko Kostiaista mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta sekä asiantuntevasta ja välittävästä ohjauksesta. Kannustavat kommentit auttoivat vaikeuksien ylittämisessä.

Pitkä ja raskas tutkinto tuntui merkittävästi kepeämmältä kun vierellä kulki iso joukko läheisiä ihmisiä, lämmin kiitos siitä jokaiselle. Erityisesti Oskari Mikkolan (kohta DI) kanssa jaettu tuskanhiki lukuisilla kursseilla oli omiaan tekemään opiskelusta mieluista. Suuren työmäärän tekeminen ja silti elämästä nauttiminen ei olisi mahdollista ilman rakastavaa vaimoani Sofiaa. Kiitos pyyteettömästä ja kärsivällisestä avusta niin kotitöiden tekemisen kuin opiskelurauhan takaamisen suhteen. On mahtavaa jakaa elämää kanssasi.

Otaniemi, 23.4.2018

Markus Heinonen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Tiivistelmä (englanniksi)	3
Esipuhe	4
Sisällysluettelo	5
Symbolit ja lyhenteet	7
1 Johdanto	9
2 Kaksikäämikonekäyttö	11
2.1 Taajuusmuuttaja	11
2.2 Kaksikäämikone	13
2.2.1 Symmetrinen kaksikäämikone	14
2.2.2 Epäsymmetrinen kaksikäämikone	15
3 Kaksikäämikoneen malli	17
3.1 Induktanssit	17
3.1.1 Magnetointi-induktanssi	17
3.1.2 Hajainduktanssi	17
3.1.3 Keskinäisinduktanssi	19
3.2 Avaruusvektorit	21
3.3 Moottoriyhtälöt	21
3.3.1 Kaksikäämikoneen kaksiakselimalli	22
3.3.2 Vektoriavaruushajotelma	26
4 Kaksikäämikoneen säätö	29
4.1 Kaksikäämikoneen kaksiakselimalliin perustuva säätö	29
4.2 Vektoriavaruushajotelmaan perustuva säätö	31
4.3 Erillissäätö	32
4.4 Virran estimointi	33
4.5 Virtatasapaino	35
4.6 Dynamiikka	36
4.6.1 Virtamalli	36
4.6.2 Jännitemalli	37
4.7 Yliaallot	39
4.8 Suhteellisarvot	39
5 Mittaukset	41
5.1 Induktanssien mittaaminen	41
5.2 Epäsymmetrisen kaksikäämikoneen erillissäätö	44
5.2.1 Vääntömomenttirippeli	46
5.2.2 Virtahäviöt	46

5.2.3	Kokonaisharmoninen särö	47
5.2.4	Jänteistyksen vaikutus yliaaltoihin	50
5.2.5	Jännitteet	52
5.2.6	Laakerivirrat	55
6	Yhteenveto	56
	Viitteet	60

Symbolit ja lyhenteet

Symbolit

f	taajuus
i	virta
I	virran tehollisarvo
k_r	korjauskerroin
L	induktanssi
L_m	magnetointi-induktanssi
L_σ	hajainduktanssi
$L_{\sigma k}$	canay-hajainduktanssi
$L_{\sigma 12}$	staattorikäämien välinen keskinäishajainduktanssi
l'	rautasydämen efektiivinen pituus
M	keskinäisinduktanssi
N	kierroslukumäärä
p	napaparien lukumäärä
P_{cu}	virtahäviöteho
q	vakoluku
R	resistanssi
S	näennäisteho
t	aika
T	vääntömomentti
u	jännite
U	jännitteen tehollisarvo
y	jakomitta
y_Q	napajako
θ	roottorin kulma
λ	permeanssi
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
ξ_w	käämityskerroin
ϕ	vaihe-ero
Φ	magneettivuo
Φ_m	päävuo, magnetointivuo
Φ_σ	hajavuo
ψ	käämivuo
ψ_m	ilmavälikäämivuo
ψ_σ	hajakäämivuo
ω	kulmanopeus

Alaindeksit

a	vaihe a
b	vaihe b
B	perusarvo
c	vaihe c
d	roottorikoordinaatiston pitkittäiskomponentti, hampaanpää
D	vaimennuskäämin pitkittäiskomponentti
est	estimaatti
ew	vyyhdenpää
f	magnetointikäämi
N	nimellisarvo
$ohje$	ohjearvo
PM	kestomagneetti
pu	suhteellisarvo
q	roottorikoordinaatiston poikittaiskomponentti
Q	vaimennuskäämin poikittaiskomponentti
r	roottori
s	staattori
sq	vinokomponentti
u	ura
1	ensimmäinen staattorikäämi
2	toinen staattorikäämi
α	staattorikoordinaatiston pitkittäiskomponentti
β	staattorikoordinaatiston poikittaiskomponentti
δ	ilmaväli
ν	yliaallon järjestysluku

Lyhenteet

DTC	Direct Torque Control	suora vääntömomentin säätö
DTP	Dual Three-Phase modeling approach	kaksikäämikoneen kaksiakselimalli
FEM	Finite Element Method	elementtimenetelmä
ID	Identification Run	identifiointiajo
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	
pu	per unit	suhteellisarvo
SMV		vastasähkömotorinen voima
THD	Total Harmonic Distortion	kokonaisharmoninen särö
VSD	Vector Space Decomposition	avaruusvektorihajotelma

1 Johdanto

Turvallisuus on nykyään teollisuustuotteiden yksi tärkeimmistä ominaisuuksista. Meriteollisuudessa kansainvälinen merenkulkujärjestö International Maritime Organization on laatinut ohjeistuksen laivan rakentajille, jonka mukaan propulsiojärjestelmien tulee olla redundantteja [1]. Redundanttisessa järjestelmässä moninkertaistetaan kriittisten komponenttien tai toiminnollisuuksien lukumäärä, tarkoituksena järjestelmän luotettavuuden lisääminen. Tällöin vian sattuessa yhteen osaan järjestelmää tulee toisen osan pystyä jatkamaan toimintaansa tai korvaamaan vioittunut osa lyhyen ajan sisällä. Näin varmistetaan sekä laivan sisäisien toimintojen ylläpito, että liikkeessä pysyminen. Tässä luvussa käytetään esimerkkinä suurten risteilijöiden propulsiojärjestelmiä, mutta redundanttisuutta voidaan yhtä hyvin hyödyntää myös muissa sovelluksissa kuten hissikäytöissä.

Sähkökäytöllä tarkoitetaan sähkökoneen eli sähkömoottorin tai -generaattorin ja sitä ohjaavan tehoelektroniikkakomponenttien (suuntaajien) sekä sähköverkon muodostamaa kokonaisuutta. Sähkökäytöissä redundanttisuus voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Se voi olla redundantti niin sähkökoneen, suuntaajien, ohjauksen kuin verkonkin suhteen. Myös kokonaisien propulsiojärjestelmien määrää voidaan kasvattaa, jolloin vioittuneet järjestelmät voidaan tarvittaessa korvata varalla olevilla järjestelmillä. Kustannussyistä kiinnostavampi vaihtoehto on järjestelmä, jossa ei ole sähkökoneiden määrää kasvatettu vaan staattorikäämytykseen on lisätty vaiheita. Kun vaihtosähkökoneessa on enemmän kuin kolme staattorikäämiä, puhutaan monivaihekoneesta. Monivaihekoneita on tutkittu jo lähes 50 vuotta [2, 3], mutta vasta 2000-luvun puolella on maailmanlaajuisesti todellinen kiinnostus herännyt niitä kohtaan [4]. Monivaihekoneen hyötyjä kolmivaihekoneeseen verrattuna ovat ainakin:

- Koneen teho jakautuu useammalle vaiheelle, jolloin vaihevirta pienenee [3, 5].
- Menetettyään yhden vaiheen monivaihekone voi toimia lähes normaalisti, toisin kuin kolmivaihekone.
- Vääntömomentin rippeli on korkeataajuisempaa ja sen amplitudi on pienempi [3, 6, 7].

Monivaihekoneen heikkouksia taas ovat ainakin:

- Taajuusmuuttajalla syötettynä staattorikäämien välille voi syntyä kiertäviä virtoja, jotka lisäävät rautahäviöitä [8].
- Ohjauksen toteutus on monimutkaisempaa kuin kolmivaihekoneella.

Kaksikäämikone on monivaihekone, jossa on kaksi kolmivaiheista käämiryhmää. Kaksikäämikoneen käämiryhmien välillä on vahva magneettinen kytkeytyneisyys. Vaikka kaksikäämikoneen käämitykset ovat galvaanisesti erotettuja toisistaan, muodostuu induktion seurauksena myös toiseen käämiin jännite, vaikka toinen syöttö olisikin pois päältä. Indusoitunut jännite luo Faradayn lain mukaan virran joka pyrkii vastustamaan toisessa käämissä tapahtuvaa vuon muutosta. Tämä indusoitunut

jännite tulee huomioida koneen ohjauksessa, jotta säätö toimii eikä suuria yliaaltoja synny. Tässä työssä esitellään kolme kaksikäämikoneen mallinnustapaa, joiden avulla mallipohjainen säätö voidaan toteuttaa.

Perinteisesti kaksikäämikoneita on mallinnettu kaksikäämikoneen kaksiakselimallin avulla, jossa käämiryhmiä välinen magneettinen kytkeytyminen on otettu huomioon. Ohjaus on toteutettu kahdella ohjauskortilla ja kahdella kolmivaiheisella vaihtosuuntaajalla [3, 9]. Käämien virtatietoja jaetaan ohjauskorttien kesken. Tällöin vaihtosuuntaajat osaavat ottaa huomioon toisen käämiryhmän indusoimat jännitteen ja erottaa ne syöttämistään jännitteistä. Tällöin säädöt toimivat, eikä ylimääräisiä yliaaltoja synny.

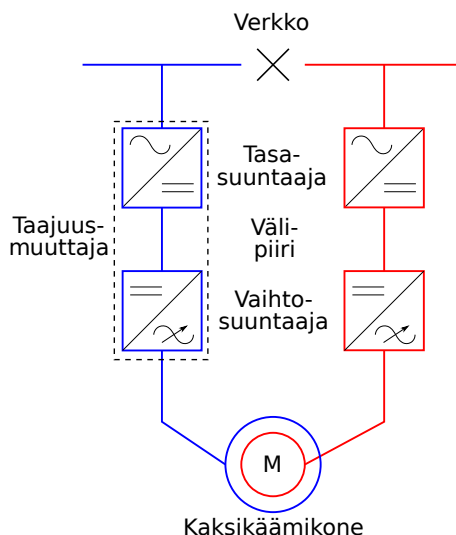
Suosiotaan kasvattava vektoriavaruushajotelma esittää vääntömomenttia luovat ja yliaaltoja aiheuttavat virtakomponentit erillisillä aliavaruuksilla [10]. Tällöin momenttisäätö yksinkertaistuu kaksikäämikoneen kaksiakselimalliin verrattuna ja tiettyjä yliaaltoja voidaan kompensoida pois. Hajotelman käyttö vaatii yhteisen ohjauksen koko koneelle ja se on monimutkainen toteuttaa [10, 11]. Edellä mainitut mallinnustavat vaativat huomattavan määrän kehitystyötä toimiakseen. Dynamiikkavaatimuksiltaan yksinkertaisiin sovelluksiin ei ole mielekasta käyttää resursseja korkean dynamiikan saavuttamiseksi.

Kolmas ja yksinkertaisin vaihtoehto on tässä työssä esitetty erillissäätö käyttäen virtaestimaattia. Virtaestimaatin käyttö poistaa säätöjen välisen kytkeytymisen, joka muuten olisi iso ongelma kahdella erillissäädetyllä taajuusmuuttajalla. Erillissäädössä käytetään kahta tavallista kolmivaihekoneen säätöä kaksikäämikoneen ohjaukseen. Säädöt mallintavat koneen kuten tavallisen kolmivaihekoneen eikä magneettista kytkeytymistä oteta huomioon. Erillissäätö on usein todettu aiheuttavan korkeita virran yliaaltoja ja koneen ylikäynnistystä. Tässä työssä käytetään säädössä virtaestimaattia, jolloin vaihtosuuntaajat eivät huomaa kytkeytymisen kautta indusoituneita jännitteitä. Tällöin säätöjen välillä ei ole kytkeytymistä, joten säädöt toimivat eikä ylimääräisiä yliaaltoja synny.

Työn tavoitteena on osoittaa erillissäädön toimivuus ja käytettävyys. Tavoitteena on vahvistaa erillissäädön toimivuus osoittamalla mittauksin, ettei virtaestimoi erillissäätö aiheuta vääntömomenttirippeliä, ylimääräisiä staattorivirran yliaaltoja eikä ylimääräisiä jännitepiikkejä. Tämän lisäksi erillissäädön käytettävyys vahvistettiin vertaamalla sitä muihin esitettyihin ohjaustapoihin ja osoitetaan, että huolellisella koneensuunnittelulla ja -mitoituksella voidaan yksinkertaista ja edullista erillissäätöä käyttää tietyissä sovelluksissa monimutkaisien säätötapojen sijasta. Lisäksi vielä mitataan kaksikäämikoneen vaihesiirron vaikutusta koneen induktansseihin sekä simuloidaan jäniteistykseen vaikutusta staattorivirran yliaaltoihin. Näin pyritään löytämään kaksikäämikoneen rakenne, joka parhaiten soveltuu erillissäätöön.

2 Kaksikäämikonekäyttö

Kuvassa 1 on esitetty redundantin kaksikäämikonekäytön tärkeimmät osat. Erilliset taajuusmuuttajat syöttävät omia kolmivaihekkäämityksiään. Tässä työssä keskitytään erityisesti kaksikäämikestomagneettitahtikoneen toimintaan. Tässä luvussa esitellään tavanomaisen kaksitasoisen taajuusmuuttajan sekä kaksikäämikoneen rakennetta ja toimintaa.



Kuva 1: Kaksikäämikoneen redundantti taajuusmuuttajakäyttö.

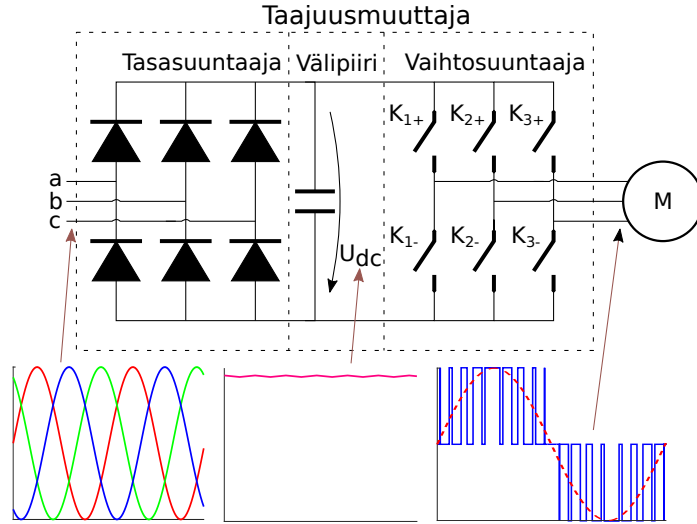
2.1 Taajuusmuuttaja

Suoraan verkosta syötetty sähkömoottori pyörii verkkotaajuuden määräämällä kulmanopeudella. Näin pyöritettävän kuorman tai prosessin säätäminen (esimerkiksi vaihteistolla tai jarruilla) on epätarkkaa ja tehotonta. Suurin hyöty sähkömoottorista saadaan taajuusmuuttajan avulla, jolla voidaan säätää prosessia tarkasti ja energiatehokkaasti.

Taajuusmuuttajan toiminta perustuu tehopuolijohdekomponentteihin, joilla verkon vaihtojännite voidaan muuntaa tasajännitteeksi, joka moduloidaan moottorille syötettäväksi vaihtojännitteeksi. Yleisimmät taajuusmuuttajat ovat jännite- tai virtavälipiirillisiä. Tässä työssä keskitytään ainoastaan jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin.

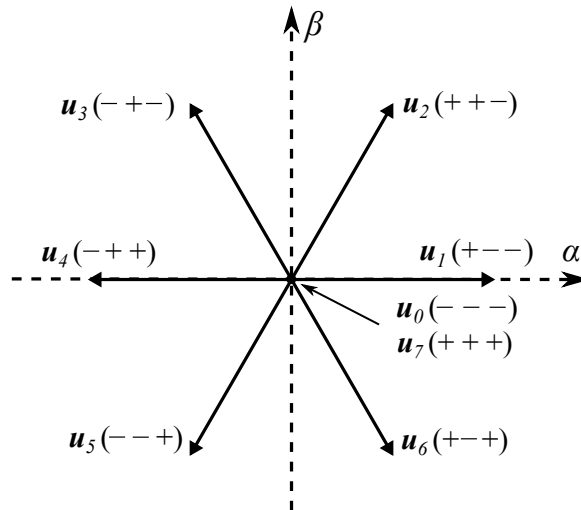
Kolmivaiheinen jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu kolmesta osasta kuvan 2 esittämällä tavalla: tasasuuntaajasta, välipiiristä sekä vaihtosuuntaajasta. Kuvassa on myös havainnollistettu jännitteen muotoa taajuusmuuttajan eri osissa.

Yksinkertaisin tasasuuntaaja sisältää diodisillan. Diodit päästävät virtaa vain yhteen suuntaan. Jos taajuusmuuttajakäytössä halutaan syöttää verkkoon tehoa, tulee tasasuuntaaja toteuttaa tyristori- tai transistorisillalla. Tyristoreilla ja transistoreilla pystytään myös säätämään välipiirin jännitettä. Välipiiri toimii energiavarastona suuntaajien välillä.



Kuva 2: Taajuusmuuttajan jännitteen muodostuminen.

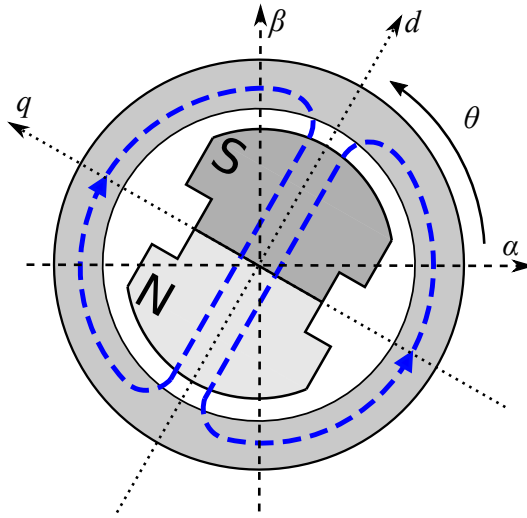
Vaihtosuuntaajalla muunnetaan suodatettu tasasähkö jälleen vaihtosähköksi sähkökoneelle. Kaksitasoisessa vaihtosuuntaajissa käytetään usein IGBT-transistoripareja, joiden lukumäärä vastaa ulostulovaiheiden määrää. Niiden kytkeytymistä ohjataan yleensä pulssinleveysmodulaatiolla (englanniksi pulse width modulation) tai suoralla vääntömomentin säädöllä (englanniksi direct torque control, DTC). Säättötavasta riippumatta tehopuolijohdepareja ($K_{1...3}$) kytketään välillä positiiviseen kiskoon (+) ja välillä negatiiviseen kiskoon (-), jolloin ne muokkaavat tasajännitteestä erilevyisiä tasajännitepulsseja kuvan 2 tapaan. Jännitepulslien aikakeskiarvo tietyn jakson yli vastaa halutun lähtöjännitteen aikakeskiarvoa tällä aikavälillä. Kuvassa 3 on kolmen puolijohdeparin kytkinkombinaatioiden luomat jännitevektorit $\mathbf{u}_{0...7}$. Jännitevektorit ja siten kytkinkombinaatiot valitaan säädön määräämällä tavalla.



Kuva 3: Kaksitasoisen vaihtosuuntaajan lähtöjännitevektorit.

2.2 Kaksikäämikone

Paikallaan pysyvä staattori ja pyörivä roottori ovat sähkökoneen tärkeimmät osat. Yleisimmässä sähkökoneen rakenteessa staattori on kiinnitetty koneen runkoon ja roottori lepää laakereiden päällä staattorin sisällä. Staattori ja roottori, yhdessä näiden välissä olevan ilmapälin kanssa, muodostavat sähkökoneen magneettipiirin, joka on esitettyä kuvassa 4. Staattoriin syötettävä vaihtovirta saa ilmapälinissä aikaan pyörivän magneettikentän, johon roottorin navat lukkiutuvat magneettisesti ja roottori lähtee pyörimään kulmanopeudella $\omega_r = \frac{d\theta}{dt}$ staattorikoordinaatistoon nähden. Tahtikoneissa roottori pyörii tahtinopeudella, eli samassa tahdissa staattorin sähkökentän kanssa.



Kuva 4: Sähkökoneen magneettipiiri. Katkoviivalla merkitty staattorin luoma pyörivä magneettikenttä lävistää ilmapälin ja kaksinapaisen roottorin. Kuvassa myös staattori- ($\alpha\beta$) ja roottorikoordinaatistot (dq).

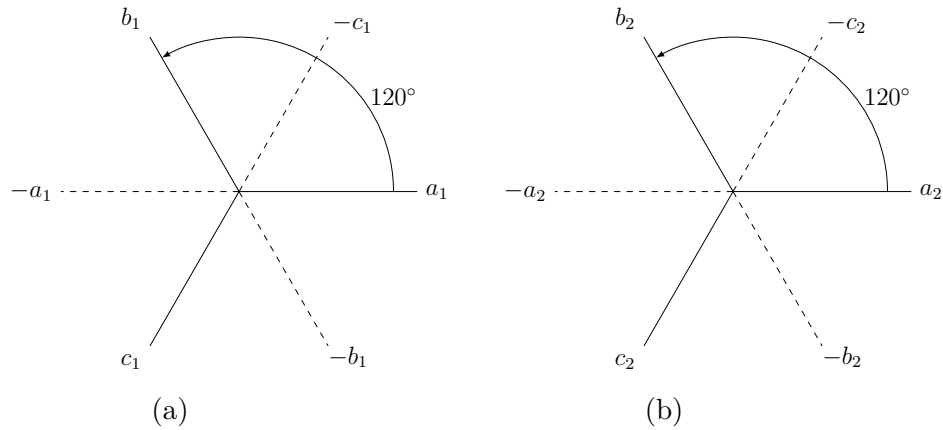
Monivaihekoneiden staattorikäämykset voidaan toteuttaa eri tavoilla. Perinteinen käämitys sisältää tyypillisesti 5, 7 tai 9 vaihetta, jotka ovat asennettu tasavälein. Varsinkin korkeatehoisissa sovelluksissa suositetaan kuitenkin tavallisen kolmivaihekäämyksen monikertoja [5]. Nämä staattorikäämykset voidaan kytkeä joko rinnan tai sarjaan. Sarjaan kytkettyjä staattorikäämejä ohjataan yhdellä taajuusmuuttajalla, jolloin toisen kolmivaihekäämin vikaantuessa toista pystytään vielä käyttämään ohittamalla vikaantunut käämi kontaktoreiden avulla. Sarjaankytkentä on huomattavasti hankalampi toteuttaa kuin galvaanisesti erotetut rinnakkaiset käämykset eikä siinä saada kahden taajuusmuuttajan tuomaa redundanttisuutta aikaiseksi, joten rinnakkainen kytkentä on suositumpi vaihtoehto.

Tässä työssä keskitytään ainoastaan rinnakkaisiin käämyksiin. Näistä tyypillisin ja eniten tutkittu on kuusivaiheinen kaksikäämikone, jonka käämykset ovat 30° vaihe-erolla toisiinsa nähden [5]. Edellä mainittu konetyyppi rakennetaan tavallisesta kolmivaihekoneesta jakamalla käämykset kahteen identtiseen kolmivaiheheryhmään,

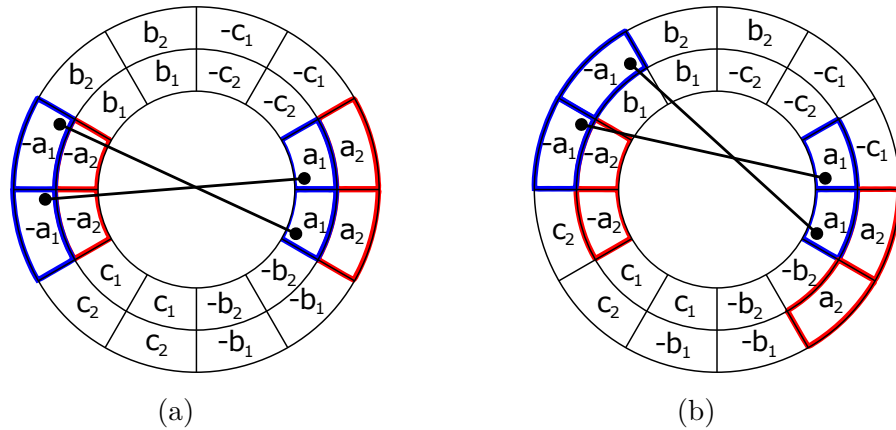
jotka ovat 30° vaihe-erolla toisiinsa nähden [3, 12]. Nämä kaksi kolmivaihekäämitystä ovat galvaanisesti erotettuja toisistaan, joten niitä voidaan ohjata autonomisesti erillisillä suuntaajilla. Tästä kuusivaihekoneesta käytetään tässä työssä nimitystä kaksikäämikone (englanniksi dual-stator winding, double-star tai dual three-phase machine [5]).

2.2.1 Symmetrinen kaksikäämikone

Kaksikäämikoneissa tähteen kytketyt staattorikäämit ovat galvaanisesti erotettu toisistaan, joten niillä on erilliset tähtipisteet. Symmetrisellä kaksikäämikoneella tarkoitetaan tässä työssä kaksikäämikoneetta, jonka staattorikäämit ovat samassa vaiheessa eli vaihesiirto on nolla astetta (kuva 5).



Kuva 5: Kaksikäämimoottorin käämit kun käämien vaihe-ero on 0° : a) ensimmäinen käämi, b) toinen käämi.



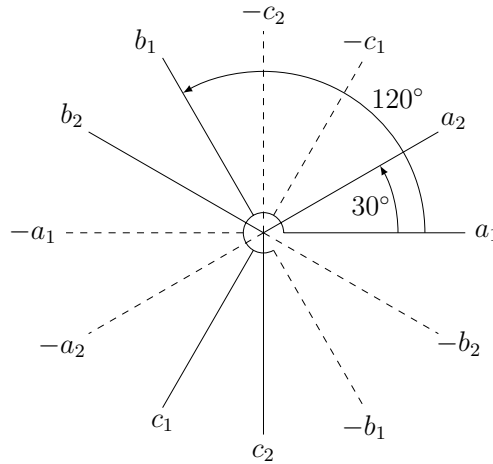
Kuva 6: Symmetrisen kaksikäämikoneen käämien asettelu staattoriurissa a) jäniteistämättömänä ja b) 5/6-jäniteistyksellä, kun koneissa on kaksi napaa ja 12 uraa.

Kuvissa 6a ja 6b on havainnollistettu symmetrisen kaksikäämikoneen vaiheiden asettelua kaksikerroksisissa urissa. Vaiheet a_1 , b_1 ja c_1 kuuluvat ensimmäiseen

käämiryhmään ja a_2 , b_2 ja c_2 toiseen käämiryhmään. Samaan vaiheeseen kuuluvat vierekkäiset urat (esimerkiksi a_1 ja a_1) muodostavat yhden staattorin navan. Tämä napa yhdessä vastakkaisella puolella olevan vastakkaismerkkisen navan kanssa ($-a_1$ ja $-a_1$) muodostavat napaparin p . Kuvassa 6a on esitetty symmetrinen kaksikäämikone jäniteistämättömänä. Tällöin jokaisessa koneen urassa on molempiin käämiryhmiin kuuluvat vaiheet [13]. Kuvassa 6b on esitetty symmetrinen kone 5/6-jäniteistyksellä. Jäniteistys on toteutettu lyhentämällä käämitysaskelta, tällöin osassa urista on samaan käämiryhmään kuuluvat vaiheet [4]. Kun ensimmäisen ja toisen staattorikäämin vaiheet on sijoitettu samoihin uriin, on niillä vahva magneettinen kytkeytyminen eli niiden välinen keskinäishajainduktanssi on suuri.

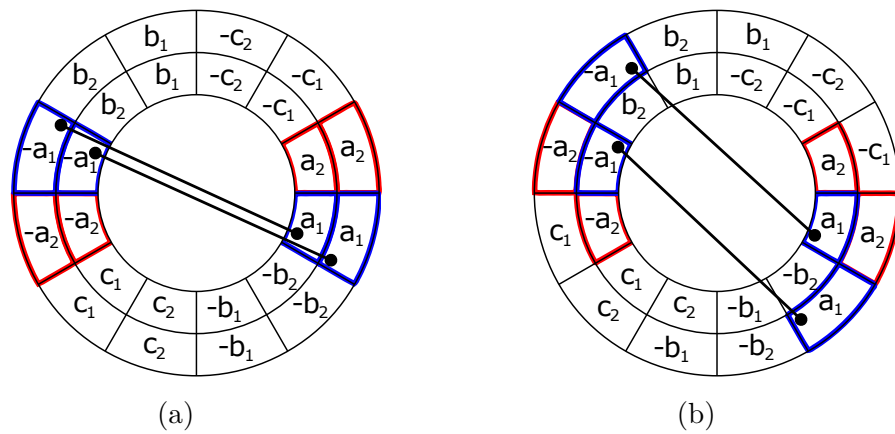
2.2.2 Epäsymmetrinen kaksikäämikone

Kaksikäämikone 30° vaihesiirrolla (kuva 7) on selvästi suosituin monivaihekonetyyppi sovelluksiin, joissa tarvitaan suuria tehoja [5]. Kyseiselle konetyypille käytetään tässä työssä nimitystä epäsymmetrinen kaksikäämikone (englanniksi split-phase tai asymmetric six-phase machine). Kuvissa 8a ja 8b on esitelty epäsymmetrisen kaksikäämikoneen staattorikäämien asettelu urissa. Kuvassa 8a on esitetty epäsymmetrinen kaksikäämikone jäniteistämättömänä. Tällöin jokaisessa koneen urassa on samaan käämiryhmään kuuluvat vaiheet [14]. Kuvassa 8b on esitetty epäsymmetrinen kone 5/6-jäniteistyksellä. Tällöin kaikissa urissa on molempiin käämiryhmiin kuuluvia vaiheita [4].

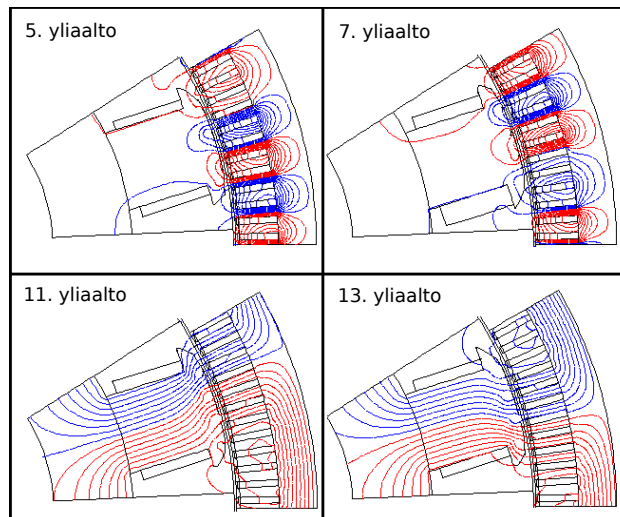


Kuva 7: Epäsymmetrisen kaksikäämikoneen staattorikäämit.

Kaksikäämikoneen käämien epäsymmetrisellä asettelulla on huomattava etu symmetriseen asetteluun nähden, sillä se eliminoi ilmavälivuon yliaallot järjestyslukua $k = 6n \pm 1$, $n = 1, 3, 5, \dots$ [3, 15]. Tämä johtuu käämiryhmien välisestä 30° sekä fyysisestä että sähköisestä vaihe-erosta. Nämä yliaaltokomponentit esiintyvät aikaharmonisina virroissa, mutta eivät kuitenkaan osallistu vääntömomentin muodostamiseen (kuva 9) [16, 17]. Tällöin ei myöskään esiinny järjestysluvun kuusi vääntömomenttirippeliä.



Kuva 8: Epäsymmetrisen kaksikääkikoneen käämien asettelu staattoriurissa a) jäniteistämättömänä ja b) 5/6-jäniteistyksellä, kun koneissa on kaksi napaa ja 12 uraa.



Kuva 9: Syötön eri yliaaltojen muodostamat vuokentät 30° vaihesiirrolla. [17] (Muokattu)

3 Kaksikäämikoneen malli

Sähkökoneen mallilla tarkoitetaan matemaattista mallia koneen fyysisistä ominaisuuksista. DTC-säädössä moottorimalli laskee käämivuon ja vääntömomentin estimaatit, joita verrataan ohjearvoihin. Vektoripohjaisten säätöjen toiminta perustuu tarkalle koneen mallille. Olennainen osa tarkkaa mallia on induktanssien tarkka määrittäminen. Normaaliin kolmivaihekoneeseen verrattuna kaksikäämikoneen mallin tulee tavalla tai toisella ottaa huomioon käämiryhmien välinen keskinäisinduktanssi, sillä se vaikuttaa koneen toimintaan merkittävästi. Tämän luvun ensimmäisessä alaluvussa käsitellään kaksikäämikoneen induktansseja ja niiden määrittämistä. Tämän jälkeen esitellään kaksikäämikoneen yleisimmät mallintamismenetelmät.

3.1 Induktanssit

Amperen lain mukaan johtimessa kulkeva virta luo ympärilleen magneettivuon Φ . Kun johtimesta tehdään silmukoitu kela, jossa on N silmukkaa, linkittyy silmukoiden luomat magneettivuot ja muodostuu käämivuo $\psi = N\Phi$. Käämivuohon liittyvää induktanssia kutsutaan itseinduktanssiksi L .

Sähkökoneen kokonaisvuo muodostuu päävuosta Φ_m ja hajavuosta. Päävuo linkittää staattorin ja roottorin sähkömagneettisesti toisiinsa (kuva 4), jolloin puhutaan ilmavälin käämivuosta ψ_m . Tämä käämivuo, toisin kuin hajavuon luoma hajakäämivuo ψ_σ , osallistuu sähkömekaanisen energian muuntamiseen. Ilmavälin käämivuohon liittyvää induktanssia kutsutaan magnetointi-induktanssiksi L_m ja hajakäämivuohon liittyvää induktanssia taas hajainduktanssiksi L_σ . Kolmivaiheisen tahtikoneen kohdalla staattorin induktanssia kutsutaan tahti-induktanssiksi ja se on magnetointi-induktanssin ja staattorin hajainduktanssin summa $L_s = L_m + L_{\sigma s}$. [18]

3.1.1 Magnetointi-induktanssi

Magnetointi-induktanssi on sähkökoneen tärkein induktanssi, sillä sen luoma vuo yhdistää staattorin ja roottorin sähkömagneettisesti toisiinsa. Magnetointi-induktanssi ei ole vakio, vaan se muuttuu magneettivuontiheyden ja vääntömomentin funktiona. Vuontiheyden kasvaessa rautaosat voivat kyllästyä. Tällöin induktanssin arvo laskee. Myös vääntömomentin kasvaessa induktanssi laskee, sillä vuo joutuu kulkemaan kyllästyneempiä polkuja pitkin. [18]

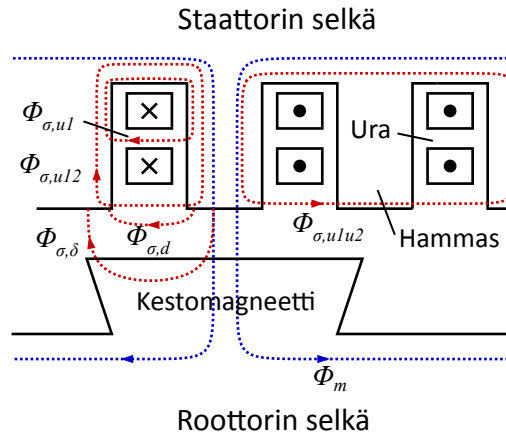
3.1.2 Hajainduktanssi

Hajavuohon kuuluu kaikki koneen tuottama vuo joka ei ylitä ilmaväliä sekä vuo joka ylittää ilmavälin, mutta ei kuitenkaan kuulu päävuohon. Hajavuo ja siihen liittyvät induktanssit voidaan Pyrhösen ym. [18] mukaan jakaa viiteen osaan:

- uran hajainduktanssi $L_{\sigma,u}$;
- vyyhdenpään hajainduktanssi $L_{\sigma,ew}$;
- hampaanpään hajainduktanssi $L_{\sigma,d}$;

- vinoinduktanssi $L_{\sigma,sq}$;
- ilmapälin hajainduktanssi $L_{\sigma,\delta}$.

Uran, hampaanpään ja vyyhdenpään hajainduktanssit ovat fysikaalisesti todellisia induktansseja ja ne ovatkin koneen tärkeimmät hajainduktanssit [19]. Muita induktansseja käytetään korjaamaan mallien yksinkertaistamisesta johtuvia virheitä [18]. Kuvassa 10 $\Phi_{\sigma,u1}$ kuvastaa yhden käämin luomaa uran hajavuota, $\Phi_{\sigma,u12}$ on samassa urassa olevien käämien keskinäinen uran hajavuo ja $\Phi_{\sigma,u1u2}$ on kahden uran välinen keskinäinen hajavuo.



Kuva 10: Staattorin hajavuot.

Hajainduktanssin suuruus on yleisesti 5-10 % koneen kokonaisinduktanssista [20]. Kahden käämin välisen keskinäishajainduktanssin suuruus riippuu useasta tekijästä: käämien välisestä etäisyydestä, käämien kierroslukumäärästä, käämien asennosta toisiinsa nähden sekä käämien muodosta ja koosta. Jos käämit ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden, ei niillä ole magneettista kytkeytyneisyyttä. Avonapakoneessa ilmapälin epätasaisuus kuitenkin aiheuttaa magneettisen kytkeytymisen myös niiden käämien välille jotka ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Tästä syystä esimerkiksi epäsymmetrisessä kaksikämmikoneessa käämien a_1 - c_2 , b_1 - a_2 ja c_1 - b_2 välinen keskinäisinduktanssin keskiarvo on nolla, mutta roottorin asennosta riippuvainen termi on nolasta poikkeava [21]. Vierekkäisten urien välinen keskinäishajainduktanssi $L_{\sigma,u1u2}$ on merkityksettömän pieni kaksikämmikoneelle, jonka käämien välinen vaihe-ero on 60° [22]. Vaihe-eroilla 0° ja 30° tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa.

Uran hajainduktanssi on yleensä merkittävin hajainduktanssin osa. Kaksikämmikoneessa uran hajainduktanssiin vaikuttaa voimakkaasti staattorikäämien välinen vaihe-ero sekä käämitysaskel. Jänteistämättömässä kaksikerroskäämityksessä sekä ylempi että alempi käämi kuuluvat samaan vaiheeseen. Jänteisteistettynä käämit voivat olla eri vaiheita, jolloin niissä kulkee eri virta. Tällöin käämien välinen keskinäisinduktanssi pienenee verrattuna jänteistämättömään käämitykseen [23]. Jänteistetyksen vaikutusta kuvataan korjauskertoimen k_r avulla. Korjauskertoimen voidaan määrittää samassa urassa olevien ylemmän ja alemman käämien välisen sähköisen

vaihe-eron ϕ avulla

$$k_r = \frac{1}{2q} \sum_{s=1}^{2q} \cos \phi. \quad (1)$$

Uran hajainduktanssin arvo voidaan määritellä analyyttisesti yhtälöllä

$$L_{\sigma,u} = \frac{4\mu_0}{2pq} \left(\frac{N}{2} \right)^2 l' (\lambda_t + \lambda_b + 2k_r \lambda_{tb}), \quad (2)$$

missä p on napaparien lukumäärä, q on urien määrä per napa per vaihe eli vakoluku, l' on rautasydämen efektiivinen pituus, λ_t on ylemmän käämin permeanssi, λ_b on alemman käämin permeanssi ja λ_{tb} on ylemmän sekä alemman käämin välinen permeanssi [23, 24].

Vyyhdenpäiden hajainduktanssi on yleisesti jätetty huomiotta, sillä ne ovat suhteellisen kaukana koneen rautaosista. Kuitenkin, jos koneen pituuden ja halkaisijan suhde on pieni, siinä on pidennetty käämitysaskel tai sillä on ominaisesti pienet induktanssit, voi vyyhdenpäiden hajainduktanssi olla merkittävä [25]. Hampaanpään hajainduktanssi voidaan puolestaan laskea yhtälöllä

$$L_{\sigma,d} = \frac{4\mu_0}{2pq} N^2 l' \left[\left(\frac{5 \frac{\delta}{b_1}}{5 + 4 \frac{\delta}{b_1}} \right) \left(\frac{2 + 2k_r}{4} \right) \frac{y}{y_Q} \right], \quad (3)$$

missä δ on ilmapälin pituus, y on napakaaren pituus ja y_Q on napajako [23].

Jos oletetaan vinoinduktanssi ja vyyhdenpäiden sekä ilmapälin hajainduktanssi merkityksettömiksi, saadaan kokonaishajainduktanssiksi

$$L_\sigma = L_{\sigma,u} + L_{\sigma,d}. \quad (4)$$

Kaksikäämikoneissa hajainduktanssi rajoittaa syöttöjännitteen ja koneen itsensä aiheuttamia virran yliaaltoja [16]. Hajavuo myös aiheuttaa mm. pyörrevirtoja rautasydämeen ja lisää sähkökoneen häviöitä. Hajavuon keskinäiskomponentti linkittää kaksikäämikoneessa staattorikäämit magneettisesti toisiinsa. Kaksikäämikoneissa käämien kierroslukumäärän lisäksi vaihe-erolla sekä jänteistyksellä on suuri merkitys hajainduktanssin suuruuteen.

Induktanssien analyyttinen määrittäminen on työlästä eikä tarvittavia vakioita ole yleensä saatavilla ja siksi ne yleensä lasketaan elementtimenetelmillä (FEM) tai mitataan kokeellisesti. Tässä työssä erään kaksikäämikoneen induktanssit mitattiin kokeellisesti. Kaksikäämikestomagneettitahtikoneen erillissäätöä varten induktanssit sekä muut parametrit määritettiin taajuusmuuttajien identifointiajoilla (englanniksi identification run).

3.1.3 Keskinäisinduktanssi

Westerlund [13, 14] on laskenut elementtimenetelmällä symmetrisen (kuvat 6a ja 6b) ja epäsymmetrisen (kuvat 8a ja 8b) kaksikäämikoneen keskinäisinduktanssin suhteen kokonaisinduktanssiin sekä täydellä että lyhennetyllä käämitysaskeleella. Simuloinnit toteutettiin ilman roottoria, pelkällä staattorilla. Tällöin pystyttiin laskemaan

staattorin osuus keskinäisinduktanssista. Roottorin osuus eli magnetointi-induktanssi puuttuu kokonaan laskuista. Ensimmäiseen käämiryhmään syötettiin tehollisarvoinen jännite U_1 ja toinen käämiryhmä oli tyhjäkäynnissä. Toiseen käämiryhmään indusoitui keskinäishajainduktanssien kautta jännite U_2 . Staattorit oletettiin identtiksi ($L_{\sigma s1} = L_{\sigma s2}$). Staattorin keskinäisinduktanssin M_s ja staattori-induktanssin L_s suhde määriteltiin toisen ja ensimmäisen käämiryhmän jännitteiden suhteesta

$$\frac{M_s}{L_s} = \frac{L_{\sigma 12}}{L_{\sigma s1} + L_{\sigma 12}} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (5)$$

Muuntosuhde kertoo sekä käämiryhmien välisestä magneettisen kytkeytymisen että staattorin hajainduktanssin suuruudesta. Magneettisella kytkeytymisellä tarkoitetaan kuinka paljon toisen käämin jännitteen muutokset vaikuttavat toisen käämin jännitteeseen. Staattorin hajainduktanssin suuruus taas vaikuttaa käämiryhmien välillä kiertäviin virtoihin. Tulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Staattorin keksinäisinduktanssin suhde staattori-induktanssiin.

	Jänteistämätön	5/6-jänteistys
0° vaihesiirto	0,51	0,33
30° vaihesiirto	0,22	0,53

Huomataan, että magneettinen kytkeytyminen on voimakkaimmillaan kun eri käämiryhmät jakavat jokaisen uran (kuvat 6a ja 8b). Tällöin kytkeytyminen tapahtuu samassa ja vierekkäisissä urissa olevien käämien keskinäishajainduktanssien kautta. Samassa urassa olevien käämien keskinäishajainduktanssi on näistä hallitsevampi. Kytkeytyminen heikkenee kun käämiryhmät jakavat vain joka toisen uran (kuva 6b). Kuvassa 8a käämiryhmät ovat kokonaan eri urissa ja kytkeytyminen tapahtuu ainoastaan vierekkäisten urien keskinäishajainduktanssin kautta. Tällöin kytkeytyminen on heikoimmillaan.

Epäsymmetrisen kaksikämmikoneen staattorin resistanssi ja hajainduktanssi on valmistuksen aikana yleensä määritelty kun staattoriryhmät on kytketty sarjaan. Niirasan [26] mukaan seuraavia arvoja voidaan käyttää epäsymmetrisen kaksikämmikoneelle, jos parametrien tarkkoja arvoja ei ole mitattu

$$\begin{cases} R_s = 2R_1 \\ L_{\sigma s1} = L_{\sigma s2} = 1,3L_1 \\ L_{\sigma 12} = 0,35L_1 \end{cases}, \quad (6)$$

missä R_1 on staattoriresistanssi ja L_1 on staattorin hajainduktanssi kun käämiryhmät on sarjassa. Yhtälöryhmästä (6) saadaan staattorin keskinäishajainduktanssin suhde staattori-induktanssiin

$$\frac{L_{\sigma 12}}{L_{\sigma s1} + L_{\sigma 12}} = 0,21. \quad (7)$$

Huomataan, että Westerlundin [14] jänteistämättömänä epäsymmetrisen kaksikämmikoneen arvo (0,22) on hyvin lähellä Niirasan [26] arviota (0,21). Lyhennetyllä käämitysaskeleella käämiryhmät jakavat samoja uria, joten myös keskinäishajainduktanssin suhde staattorin hajainduktanssiin kasvaa huomattavasti.

3.2 Avaruusvektorit

Symmetrisen kolmivaihejärjestelmän virroille pätee

$$i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) = 0. \quad (8)$$

Vaihevirtojen summa on kokoajan nolla, joten nollakomponenttia ei esiinny. Tällöin voidaan luopua yhdestä vapausasteesta eli järjestelmä voidaan kuvata kahdella suureella kolmen sijaan. Tällöin avaruusvektori \mathbf{x} voidaan esittää staattoriin sidotussa $\alpha\beta$ -koordinaatistossa komponenttimuodossa

$$\mathbf{x}^s(t) = \begin{bmatrix} x_\alpha(t) \\ x_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

jossa α on reaali- ja β imaginääriosaa.

Staattorikoordinaatisto eli $\alpha\beta$ -koordinaatisto on staattinen kun taas dq -koordinaatisto on sidottu roottoriin ja pyörii sen mukana. Nämä kaksi koordinaatistoa on esitetty kuvassa 4. Roottorikoordinaatiston avaruusvektoreiden komponenttimuoto on

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_d(t) \\ x_q(t) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

missä alaindeksit d ja q viittaavat roottorikoordinaatiston pitkittäis- ja poikittaisakselihin. Dq -muunnos eli muunnos staattorikoordinaateista roottorikoordinaatteihin on

$$\begin{bmatrix} x_d(t) \\ x_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta(t) & \sin \theta(t) \\ -\sin \theta(t) & \cos \theta(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_\alpha(t) \\ x_\beta(t) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Käänteinen muunnos saadaan käänteismatriisilla. Tunnettu Park-muunnos esittää staattorin fyysiset vaihesuureet suoraan roottorikoordinaatistossa [27]. Muunnosmatriisi kolmivaihekoneen mallintamiseen roottorikoordinaatistossa on

$$\begin{bmatrix} x_d(t) \\ x_q(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

missä nollakomponentti on jätetty huomiotta. Park-muunnos eliminoi induktanssien riippuvuuden roottorin asennosta ja esittää perussuureet tasakomponentteina pysyvässä tilassa. [21]

3.3 Moottoriyhtälöt

Kaksikäämikone käyttäytyy pääosin samalla tavalla kuin kaksi moottoria joilla on yhteinen akseli [28]. Samoissa urissa olevat staattorikäämykset alkavat luomaan ja käyttämään yhteistä vuota. Kaksikäämikoneen matemaattinen mallintaminen onnistuu hyvin samalla tavalla kuin tavallisen kolmivaihekoneen mallintaminenkin ja yleensä molempiin pätee samat alkuoletukset: sinimuotoinen virtakate, tasainen ilmäväli ja magneettinen kyllästymisen sekä rautahäviöt jätetään huomiotta [11].

Epäsymmetrisen kaksikämmikoneen kämmiryhmien yhteissäätöä varten on kehitetty vektoriavaruushajotelma (englanniksi vector space decomposition, VSD), jota käytetään yleisesti kun staattorikämmejä halutaan käsitellä yhtenä kokonaisuutena. Vektoriavaruushajotelma käsittelee kaksikämmikoneen kuusivaihekoneena. Kaksikämmikoneen kaksiakselimalli (englanniksi dual three-phase modeling approach, DTP [11]) mallintaa kämmiryhmät erillisinä kolmivaiheisina kokonaisuuksina.

3.3.1 Kaksikämmikoneen kaksiakselimalli

Kolmivaiheisen tahtikoneen mallintamiseen käytetään yleensä avaruusvektorteoriaan pohjautuvaa kaksiakselimallia (kuva 11), jossa muunnetaan vaihesuureet dq -koordinaatistoon. Pitkittäissuunnan (d) virtapiirissä on mukana koneen magnetointipiiri. Pitkittäissuunnan induktanssit poikkeavat poikittaissuunnan (q) induktansseista johtuen avonapakoneen epätasaisesta ilmastavälistä. Nelson ja Krause [29] käyttivät monivaiheisen induktiokoneen mallintamiseen Parkin muunnosta erikseen jokaiselle kolmivaihekämmille. Samalla idealla voidaan kaksikämmikone mallintaa kahdella dq -koordinaatistolla [5], kun staattorikämmet on tähteenkytketty. Molemmille kämmille esitetään omat jännite- ja kämmivuoyhtälöt roottorikoordinaatistossa. Tätä mallintamistapaa kutsutaan tässä työssä nimellä kaksikämmikoneen kaksiakselimalli. Induktanssit esitetään roottorikoordinaatistossa, jolloin niiden arvo pysyy vakiona roottorin asennosta riippumatta.

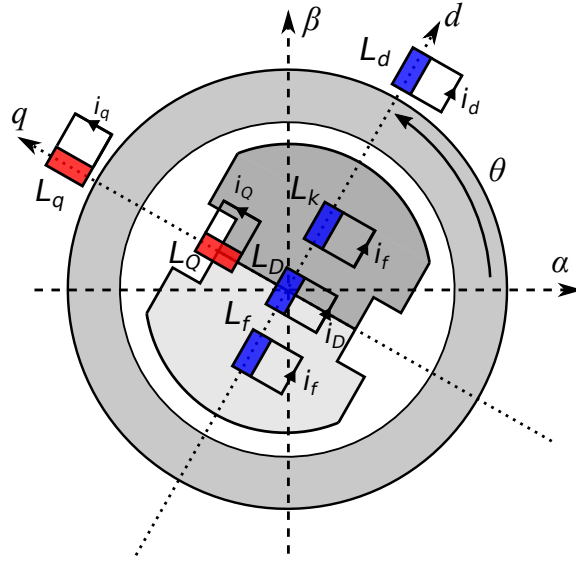
Kolmivaihekoneen kaksiakselimalliin verrattuna kaksikämmikoneen malli sisältää yhden lisäinduktanssin, staattorikämmien välisen keskinäishajainduktanssin $L_{\sigma 12}$ [4]. Ensimmäisen ja toisen kämmen näkemät keskinäishajainduktanssit ovat yhtä suuret ($L_{\sigma 12} = L_{\sigma 21}$). Tämä staattorikämmien välistä magneettista kytkeytymistä kuvaava induktanssi erottaa kaksikämmikoneen käyttäytymisen sovelluksesta, jossa on kaksi kolmivaihemootoria yhteisellä akselilla. Kaksikämmitahtikoneen ensimmäisen ja toisen kämmen itse- eli tahti-induktanssit ovat

$$\begin{cases} L_{s1} = L_m + L_{\sigma 12} + L_{\sigma s1} \\ L_{s2} = L_m + L_{\sigma 12} + L_{\sigma s2} \end{cases} . \quad (13)$$

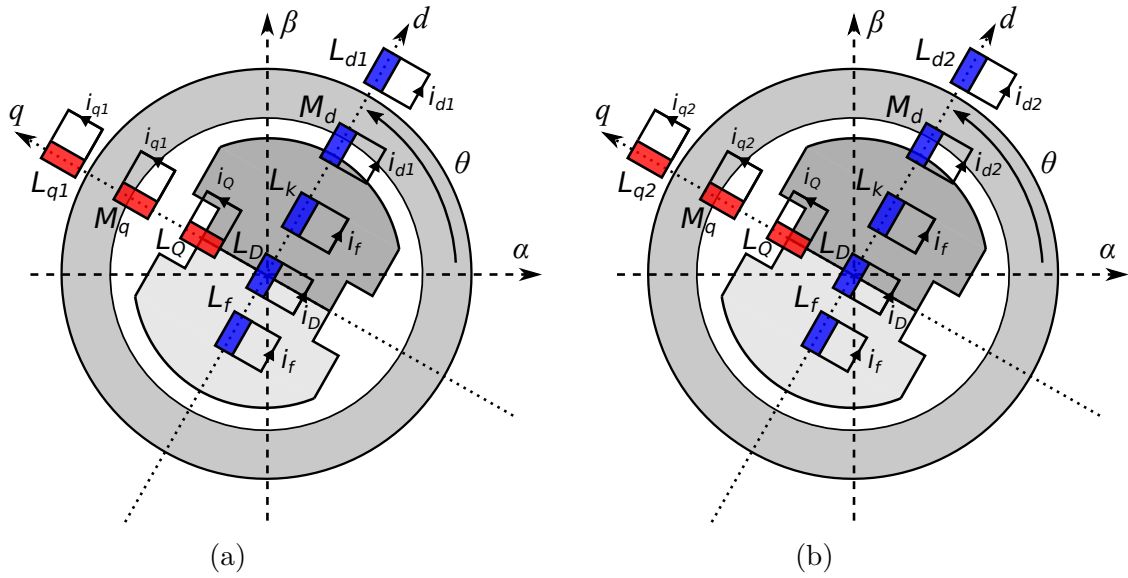
Kaksikämmikoneen staattorikämmien näkemä keskinäisinduktanssi on

$$M = L_m + L_{\sigma 12}. \quad (14)$$

Vierasmagnetoidun tahtikoneen mallista voidaan helposti johtaa muiden vaihtosähkökoneiden mallit, joten ensiksi esitellään vierasmagnetoidun kaksikämmitahtikoneen yhtälöt ja niistä johdetaan kaksikämmikestomagneettitahtikoneen vastaavat yhtälöt. Kun kämmiryhmät on oletettu identtisiksi ($L_{d1}=L_{d2}=L_d$, $L_{q1}=L_{q2}=L_q$) voi-



Kuva 11: Kaksiakselimalli vierasmagnetoidulle kolmivaiheiselle tahtikoneelle.



Kuva 12: Vierasmagnetoidun kaksikäämitahtikoneen a) ensimmäisen ja b) toisen käämiryhmän kaksiakselimalli.

daan koneen induktanssit esittää seuraavasti

$$\begin{cases} L_d = L_{md} + L_{\sigma 12} + L_{\sigma s} \\ L_q = L_{mq} + L_{\sigma 12} + L_{\sigma s} \\ M_d = L_{md} + L_{\sigma 12} \\ M_q = L_{mq} + L_{\sigma 12} \\ L_D = L_{md} + L_{\sigma D} + L_{\sigma k} \\ L_Q = L_{mq} + L_{\sigma Q} \\ L_f = L_{md} + L_{\sigma f} + L_{\sigma k} \\ L_k = L_{md} + L_{\sigma k} \end{cases}, \quad (15)$$

missä L_{md} ja L_{mq} ovat käämien itseinduktanssin pitkittäis- ja poikittaishajainduktanssit. M_d ja M_q ovat keskinäisinduktanssin pitkittäis- ja poikittaishajainduktanssit. $L_{\sigma D}$ ja $L_{\sigma Q}$ ovat vaimennuskäämin pitkittäis- ja poikittaishajainduktanssit. $L_{\sigma f}$ on roottorin magnetointikäämin hajainduktanssi ja $L_{\sigma k}$ on roottorin canay-hajainduktanssi.

Nyt vuoyhtälöt voidaan esittää induktanssien avulla pitkittäis- ja poikittaissuunnan matriiseilla

$$\begin{bmatrix} \psi_{d1} \\ \psi_{d2} \\ \psi_D \\ \psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & M_d & L_{md} & L_{md} \\ M_d & L_d & L_{md} & L_{md} \\ L_{md} & L_{md} & X_D & X_k \\ L_{md} & L_{md} & X_k & X_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_D \\ i_f \end{bmatrix} \quad (16)$$

ja

$$\begin{bmatrix} \psi_{q1} \\ \psi_{q2} \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & M_q & L_{mq} \\ M_q & L_q & L_{mq} \\ L_{mq} & L_{mq} & X_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{q1} \\ i_{q2} \\ i_Q \end{bmatrix}, \quad (17)$$

missä käämivoiden sekä virtojen alaindeksit vastaavat induktanssien alaindeksijä [9][26].

Vierasmagnetoidun kaksikämitahtikoneen vuomatriiseissa (16) ja (17) on huomioitu roottorin avonapaisuus. Vuomatriiseista voidaan johtaa myös muiden kone-tyyppien yhtälöt. Lipon [12] esittämät kaksikämi-induktiokoneen yhtälöt saadaan kun muutetaan vaimennuskäämi-induktanssi häkkikämi-induktanssiksi ja poistetaan muut vierasmagnetoiduille tahtikoneille ominaiset hajainduktanssit ($L_{\sigma k}$ ja $L_{\sigma f}$) joita ei esiinny induktiokoneissa. Kestomagneettitahtikoneelle, jossa ei ole vaimennuskäämiä ja kun oletetaan roottorin rautasydämen vaimennuksen olevan mitätön, saadaan johdettua yksinkertaistetut vuoyhtälöt

$$\begin{cases} \psi_{d1} = L_d i_{d1} + M_d i_{d2} + \psi_{PM} \\ \psi_{q1} = L_q i_{q1} + M_q i_{q2} \\ \psi_{d2} = L_d i_{d2} + M_d i_{d1} + \psi_{PM} \\ \psi_{q2} = L_q i_{q2} + M_q i_{q1} \end{cases}, \quad (18)$$

missä ψ_{PM} on roottorin kestomagneettien luoma vuo. Kestomagneetit voidaan esittää virtalähteenä i_{PM} [30], jolloin

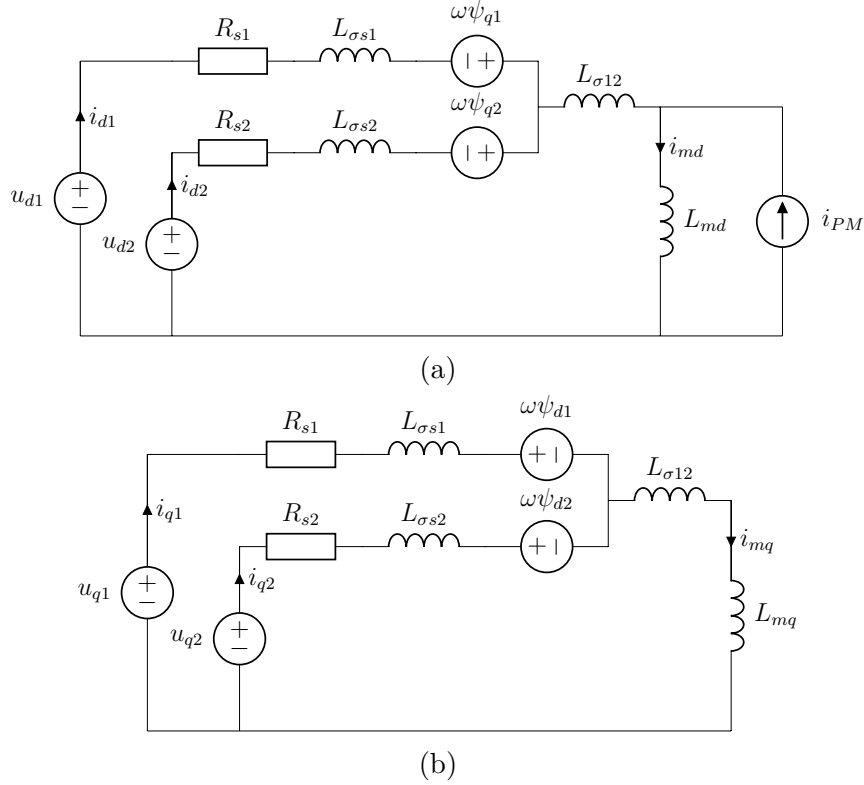
$$\psi_{PM} = L_{md} i_{PM}. \quad (19)$$

Kun oletetaan staattorikämiä olevan identtiset ($R_{s1}=R_{s2}=R_s$ ja $L_{\sigma s1}=L_{\sigma s2}=L_{\sigma s}$),

saadaan johdettua jänniteyhtälöt

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{d1} = R_s i_{d1} + \frac{d\psi_{d1}}{dt} - \omega \psi_{q1} \\ \quad = R_s i_{d1} + L_d \frac{di_{d1}}{dt} - \omega L_q i_{q1} + M_d \frac{di_{d2}}{dt} - \omega M_q i_{q2} \\ u_{q1} = R_s i_{q1} + \frac{d\psi_{q1}}{dt} + \omega \psi_{d1} \\ \quad = R_s i_{q1} + L_q \frac{di_{q1}}{dt} + \omega L_d i_{d1} + \omega \psi_{PM} + M_q \frac{di_{q2}}{dt} + \omega M_d i_{d2} \\ u_{d2} = R_s i_{d2} + \frac{d\psi_{d2}}{dt} - \omega \psi_{q2} \\ \quad = R_s i_{d2} + L_d \frac{di_{d2}}{dt} - \omega L_q i_{q2} + M_d \frac{di_{d1}}{dt} - \omega M_q i_{q1} \\ u_{q2} = R_s i_{q2} + \frac{d\psi_{q2}}{dt} + \omega \psi_{d2} \\ \quad = R_s i_{q2} + L_q \frac{di_{q2}}{dt} + \omega L_d i_{d2} + \omega \psi_{PM} + M_q \frac{di_{q1}}{dt} + \omega M_d i_{d1} \end{array} \right. \quad (20)$$

Kaksikäädikoneen dynaamisen tilan yksivaiheinen sijaiskytkentä kuvissa 13a ja 13b voidaan johtaa edellä esitellyistä jännite- ja vuoyhtälöistä. Kaksi resistanssia (R_{s1} ja R_{s2}) sekä kaksi induktanssia ($L_{\sigma s1}$ ja $L_{\sigma s2}$) kuvaavat kolmivaiheisia staattorikäimejä ja $L_{\sigma 12}$ kuvastaa staattorikäimien välistä keskinäishajainduktanssia.



Kuva 13: Kaksoiskäädikoneen kestopalettitahtikoneen dynaamisen tilan yksivaiheinen sijaiskytkentä roottorikoordinaatistossa: a) pitkittäissuunnassa, b) poikittais-suunnassa.

Kaksikäädikoneen tuottamaa vääntömomenttia voidaan arvioida magneettivo-

ja virtavektoreiden ristitulolla skalaarimuodossa

$$\begin{aligned} T_{est} &= \frac{3}{2}p(\psi_{d1}i_{q1} - \psi_{q1}i_{d1} + \psi_{d2}i_{q2} - \psi_{q2}i_{d2}) \\ &= \frac{3}{2}p[\psi_{PM}(i_{q1} + i_{q2}) + (L_d - L_q)(i_{d1}i_{q1} + i_{d2}i_{q2}) \\ &\quad + (M_d - M_q)(i_{d1}i_{q2} + i_{d2}i_{q1})] \end{aligned} \quad (21)$$

missä p on napaparien lukumäärä [9]. Vääntömomenttilauseen (21) viimeinen termi $\frac{3}{2}p(M_d - M_q)(i_{d1}i_{q2} + i_{d2}i_{q1})$ johtuu käämiryhmien magneettisesta kytkeytymisestä. Yhtälön (21) mukaan kaksikäämikoneen vääntömomenttia ei voida arvioida tarkasti ilman, että tiedetään molempien käämiryhmien virrat ja niiden keskinäisinduktanssin arvot [32]. Sijoittamalla kaksikäämikoneen vääntömomenttilauseeseen yhtälön (15) induktanssitermit voidaan vääntömomentti esittää magnetointi-induktanssien avulla

$$T_{est} = \frac{3}{2}p[\psi_{PM}(i_{q1} + i_{q2}) + (L_{md} - L_{mq})(i_{d1} + i_{d2})(i_{q1} + i_{q2})]. \quad (22)$$

3.3.2 Vektoriavaruushajotelma

Epäsymmetriselle kaksikäämioikosulkukoneelle kehitetty, yleisesti käytetty koneen mallintamistapa on vektoriavaruushajotelma [11]. Hajotelmasta käytetään yleisesti hyväksyttyä lyhennettä VSD. Zhaon ja Lipon [10] kehittämä hajotelma muuntaa sopivalla 6×6 muunnosmatriisilla ($[T_6]$) koneen alkuperäisen 6-ulotteisen vektoriavaruuden kolmeen 2-ulotteiseen aliavaruuteen (α, β) , (μ_1, μ_2) ja (z_1, z_2) . Muunnosmatriisilla on seuraavat ominaisuudet:

- Perusaallon komponentit ja järjestyslukua $k = 12n \pm 1$, $n = 1, 2, 3, \dots$ olevat yliaallot esitetään (α, β) aliavaruudessa. Nämä komponentit luovat ilmapäivävuota.
- Järjestyslukua $k = 6n \pm 1$, $n = 1, 3, 5, \dots$ olevat yliaallot esitetään (μ_1, μ_2) aliavaruudessa. Nämä yliaallot eivät luo ilmapäivävuota, sillä aliavaruudet (α, β) ja (μ_1, μ_2) ovat kohtisuorassa toisiaan vasten.
- Nollakomponentit ($k = 3n$, $n = 0, 1, 2, \dots$), jotka eivät osallistu ilmapäivävuon luomiseen, esitetään (z_1, z_2) aliavaruudessa.

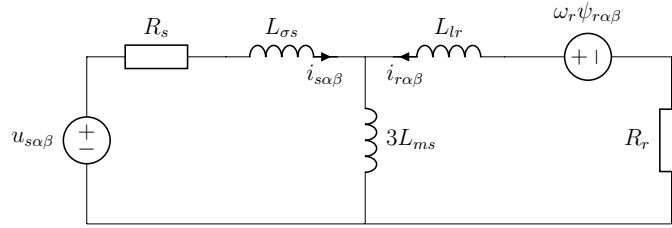
Muunnosmatriisilla saadaan induktiokoneen malli aliavaruudessa (α, β) , joka vastaa kolmivaihekoneen mallia staattorikoordinaatistossa

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} + 3L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt} \\ u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} + 3L_m \frac{di_{r\beta}}{dt} \\ 0 = 3L_m \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \omega_r \cdot 3L_m i_{s\beta} + R_r i_{r\alpha} + L_r \frac{di_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \cdot L_r i_{r\beta} \\ 0 = -\omega_r \cdot 3L_m i_{s\alpha} + 3L_m \frac{di_{s\beta}}{dt} - \omega_r \cdot L_r i_{r\alpha} + R_r i_{r\beta} + L_r \frac{di_{r\beta}}{dt} \end{cases}, \quad (23)$$

missä i_r on roottorin oikosulkuhäkin virta, R_r on roottorin resistanssi ja L_r on roottorin induktanssi [15, 31]. Vuoyhtälöt saadaan muotoon

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + 3L_m \frac{di_{r\alpha}}{dt} \\ \psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + 3L_m \frac{di_{r\beta}}{dt} \\ \psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + 3L_m \frac{di_{s\alpha}}{dt} \\ \psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + 3L_m \frac{di_{s\beta}}{dt} \end{cases}, \quad (24)$$

missä ψ_r on roottorin luoma vuo. Kuten huomataan yhtälöryhmistä (23) ja (24), vääntömomenttia luovat komponentit esiintyvät vain aliavaruudessa (α, β) . Tällöin kaksikämmikoneen ohjaus toimii kaksikulotteisessa aliavaruudessa ja siten ohjaus yksinkertaistuu [5, 15, 31]. Aliavaruuden (α, β) sijaiskytkentä (kuvassa 14) vastaa kolmivaihekoneen sijaiskytkentää.



Kuva 14: Aliavaruuden (α, β) yksivaiheinen sijaiskytkentä.

Aliavaruuksien (μ_1, μ_2) ja (z_1, z_2) mallit voidaan esittää jänniteyhtälöillä

$$\begin{cases} u_{s\mu_1} = R_s i_{s\mu_1} + L_{\sigma s} \frac{di_{s\mu_1}}{dt} \\ u_{s\mu_2} = R_s i_{s\mu_2} + L_{\sigma s} \frac{di_{s\mu_2}}{dt} \end{cases} \quad (25)$$

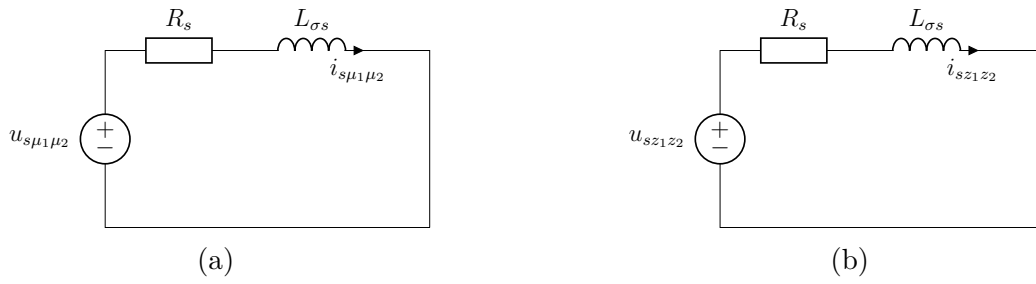
sekä

$$\begin{cases} u_{sz_1} = R_s i_{sz_1} + L_{\sigma s} \frac{di_{sz_1}}{dt} \\ u_{sz_2} = R_s i_{sz_2} + L_{\sigma s} \frac{di_{sz_2}}{dt} \end{cases}. \quad (26)$$

Näiden aliavaruuksien virtakomponentit eivät osallistu ilmavälivuon tuottamiseen. Ne tuottavat häviöitä ja niitä rajoittavat ainoastaan staattorin resistanssi sekä staattorin hajainduktanssi [5, 15, 31]. Kuvassa 15 on yhtälöryhmiä (25) ja (26) vastaavat sijaiskytkennät.

Staattorikämmien tähtipisteiden ollessa eristetyt, ei (z_1, z_2) aliavaruudessa kulje virtaa [10]. Tällöin staattorikoordinaatistossa oleva malli voidaan esittää (α, β) ja (μ_1, μ_2) aliavaruuksien avulla [10]. Nämä aliavaruudet ovat kohtisuorassa toisiaan vasten, joten niillä ei ole keskinäistä kytkeytymistä. Kaksikämmikoneen kaksiakselimalliin verrattuna vektoriavaruushajotelma siis eliminoi staattorikämmien välisen kytkeytymisen. Tämän takia malli ja ohjaus yksinkertaistuvat.

Yleisesti vektoriavaruushajotelma olettaa staattorikämmien olevan identtiset ja virtakatteen sinimuotoinen, ilmavälin olevan tasainen, sekä keskinäisinduktanssit merkityksettömiksi [10]. Hadiouche ym. [8] ovat ottaneet keskinäisiduktanssit huomioon muuttamalla alkuperäistä hajotelmaa. Tassarolo [7] yleisti hajotelman toimimaan



Kuva 15: Yksivaiheinen sijaiskytkentä aliavaruuksissa a) (μ_1, μ_2) sekä b) (z_1, z_2) .

epäsymmetrisen kaksikäähmikoneen lisäksi myös muilla monivaihekoneilla. Tassarolo [7] on kehittänyt hajotelmasta tavan mallintaa konetyyppejä, joilla ei ole tasainen ilmaväli (avonapakone) tai niiden virtakate ei ole sinimuotoinen.

4 Kaksikäämikoneen säätö

Vektorisäätöön perustuvan ohjauksen tulee pystyä estimoimaan tai mittaamaan tarkasti staattorivuon sekä vääntömomentin arvot toimiakseen. Kun nämä arvot tiedetään, pystytään vaihtosuuntaajan kytkimiä ohjaamaan siten että halutut ohjearvot saavutetaan. Johtuen käämiryhmien välisestä magneettisesta kytkeytymisestä, näiden arvojen määrittäminen on kaksikäämikoneissa monimutkaisempi prosessi kuin kolmivaihekoneissa.

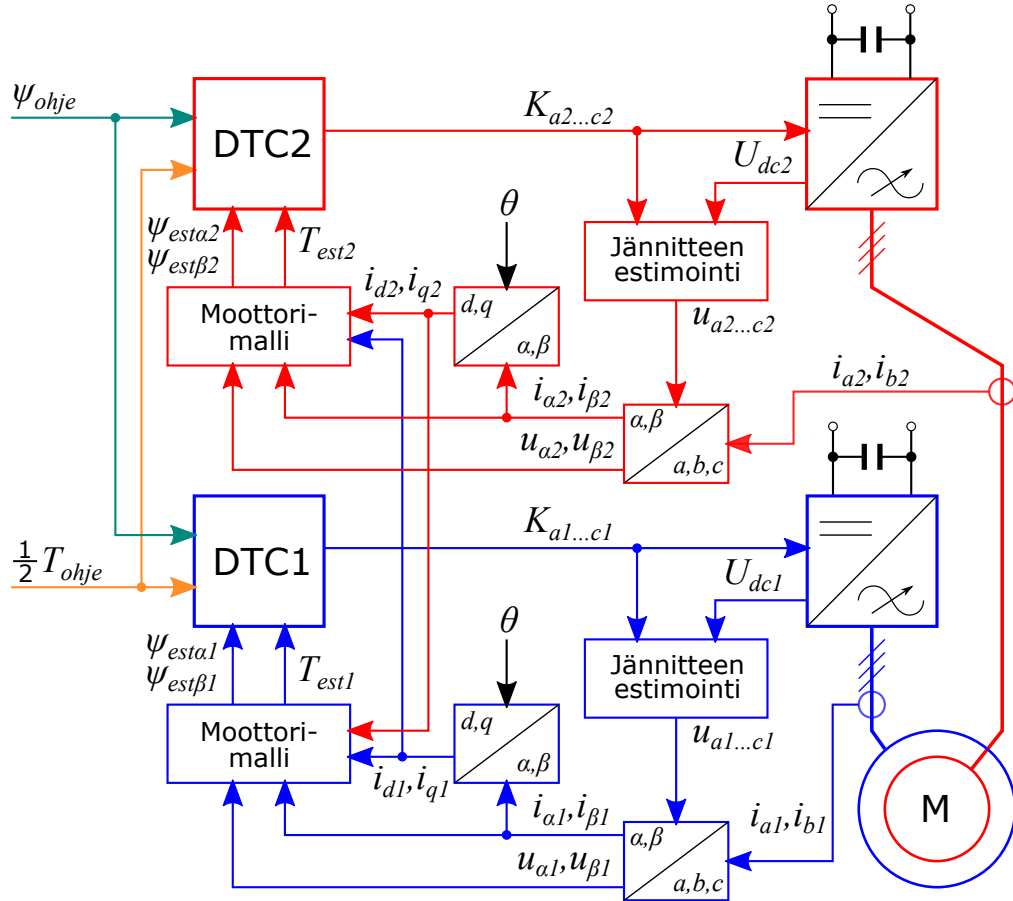
Perinteinen vaihtoehto kytkeytymisen huomioimiseen säädössä on staattorivirtatietojen jakaminen ohjausten kesken. Tällöin puhutaan kaksikäämikoneen kaksiakselimallin käyttämisestä kaksikäämikoneen säädössä. Suositaan kasvattava vektoriavaruushajotelma taas poistaa säätöjen välisen kytkeytymisen matriisihajotelman avulla. Tällöin säätö yksinkertaistuu, sillä vääntömomenttia ja vuota ohjaavan aliavaruuden (α, β) malli on identtinen kolmivaihekoneen mallin kanssa [11]. Kolmas vaihtoehto on tässä työssä esitetty erillissäätö käyttäen virtaestimaattia. Erillissäädössä käytetään kahta tavallista kolmivaihekoneen säätöä kaksikäämikoneen ohjaukseen. Virtaestimaatin käyttö poistaa säätöjen välisen kytkeytymisen, joka muuten olisi iso ongelma kahdella erillissäädetyllä taajuusmuuttajalla.

4.1 Kaksikäämikoneen kaksiakselimalliin perustuva säätö

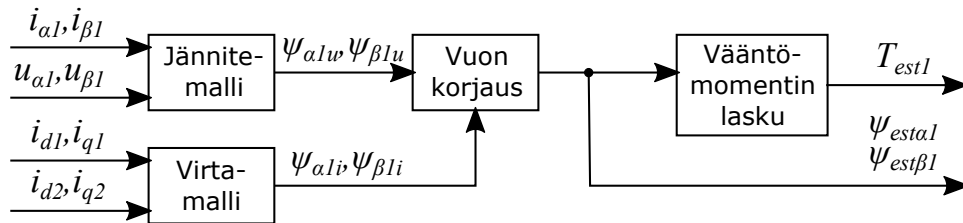
Kuvassa 16 on esitetty yksinkertainen lohkokaavio DTC-säädetyistä kaksikäämikoneen ohjauksesta, jossa moottorimallina on kaksikäämikoneen kaksiakselimalli. Molemmat käämiryhmät tuottavat puolet koneen kokonaisvääntömomentista, joten molemmille säädöille syötetään puolet koneen kokonaisvääntömomenttiohjeesta T_{ohje} . Molemmat käämiryhmät luovat sekä näkevät yhteisen vuon. Säädöt saavat saman vuo-ohjeen ψ_{ohje} . Vääntömomentti- ja vuoestimaattien laskemiseen käytetään yleensä mitattuja staattorivirtoja i_a ja i_b . Kolmatta vaihevirtaa ei yleensä mitata, sillä se tiedetään kahden mitatun vaihevirran avulla. Korkeat yhteismuodot voivat kuitenkin aiheuttaa virhettä kolmannen vaihevirran arvioon. Taajuusmuuttajan syöttämä jännite estimoidaan välipiirin tasajännitteen, kytkimien asentojen sekä kytkimissä tapahtuvien jännitehäviöiden avulla.

Burzanowska ym. [9] käyttivät epäsymmetrisen kaksikäämitahtikoneen ohjaukseen kahta DTC-säädettyä kolmivaihevaihtosuuntaajaa, jotka oli kytketty erillisiin tasajännitteisiin. Molemmat suuntaajat ohjasivat omia käämiryhmiään, mutta ne saivat tietoa myös toisen käämin virroista (kuten kuvassa 16). Kuvassa 17 on tarkempi esitys moottorimallista. Roottorikoordinaatistoon muunnetut virrat i_{d1} , i_{q1} , i_{d2} sekä i_{q2} syötetään molempien moottorimallien virtamalliin. Tällöin säädöt pystyvät ottamaan sekä vuo- että vääntömomenttiestimaattien laskuissa huomioon käämiryhmien magneettisen kytkeytymisen. Tällöin säätöjen ristikkäiskytkytyminen saadaan poistettua ja säädöt toimivat. Burzanowska ym. mukaan järjestelmän dynaaminen suorituskyky oli erinomainen. Ohjaukset toimivat häiriöttä pysyvässä tilassa, toisen suuntaajaan vikaantuessa sekä kun käämiryhmillä oli eri suuret staattorivuot.

Kaksikäämikoneen kaksiakselimallin käyttö kaksikäämikoneen ohjauksessa vaatii virtatietojen ristikkäisen jakamisen ohjauskorttien kesken. Näin saadaan mallin-



Kuva 16: Kaksikämmikoneen kaksiakselimalliin perustuva DTC-säädön lohkokkaavio. Roottorin kulma θ voidaan joko mitata anturilla tai laskea syöttöjännitteestä ja taajuudesta.

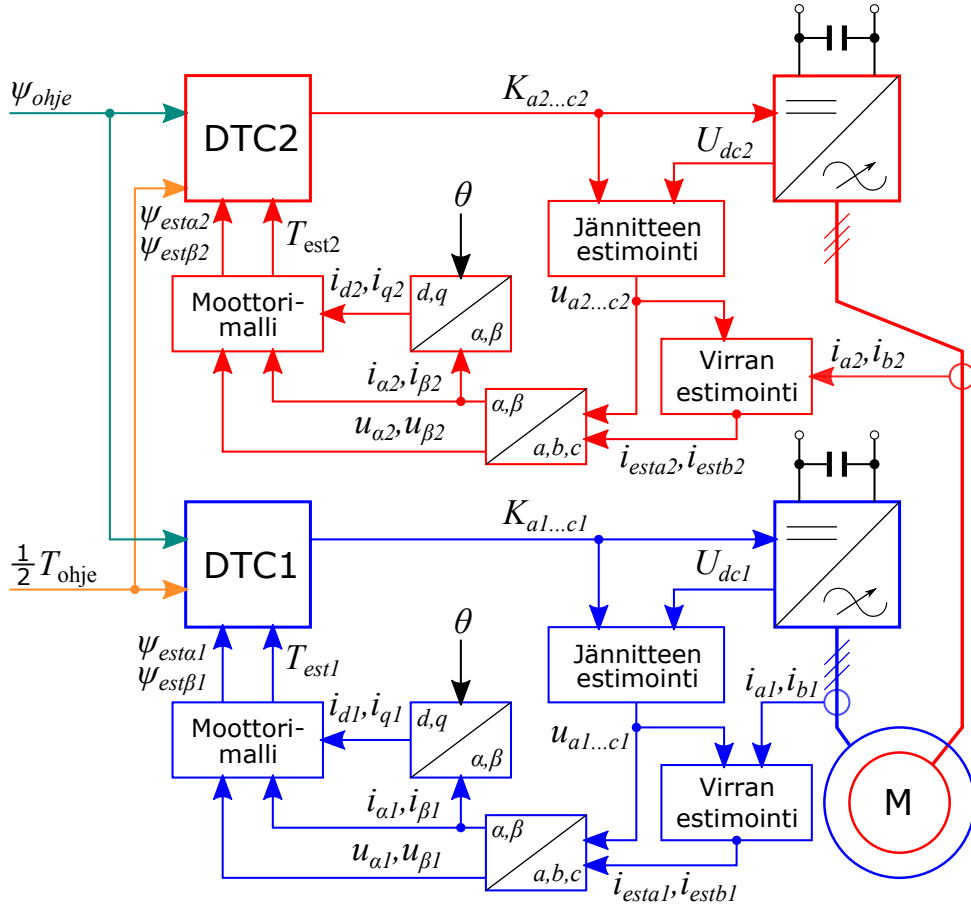


Kuva 17: Moottorimallin tarkempi lohkokkaavio.

nettua kone oikein ja säädöt osaavat erottaa syöttövirrat indusoituneista virroista. Tällöin säädön dynamiikka on hyvä, eivätkä vaihtosuuntajat tuota ylimääräisiä yliaaltoja. Kaksiakselimallia käytettäessä ei kuitenkaan voida vaikuttaa epäsymmetrisen kaksikämmikoneen ominaisiin korkeisiin matalan taajuuden yliaaltoihin niin kuin vektoriavaruushajotelmalla.

4.3 Erillissäätö

Erillissäädössä kaksikäänikone mallinnetaan perinteisillä kolmivaihekoneen yhtälöillä eikä kytkeytymistä oteta huomioon säädössä. Erillissäätöä voidaan käyttää mille tahansa monivaihekoneelle joka on kolmivaihekoneen monikerta [33]. Kuvassa 19 on esitetty tässä työssä käytetyn erillissäädön lohkokaavio. Säädöt ovat täysin erilliset toisistaan. Kuten kaksikäänikoneen kaksiakselimallin tapauksessa, molemmat kääniryhmät tuottavat puolet koneen kokonaisvääntömomentista, joten molemmille säädöille syötetään puolet koneen kokonaisvääntömomenttiohjeesta T_{ohje} . Säädöt saavat saman vuo-ohjeen ψ_{ohje} . Molemmat kääniryhmät luovat sekä näkevät yhteisen vuon.



Kuva 19: Erillissäädön lohkokaavio. Roottorin kulma θ voidaan joko mitata anturilla tai laskea syöttöjännitteestä ja taajuudesta.

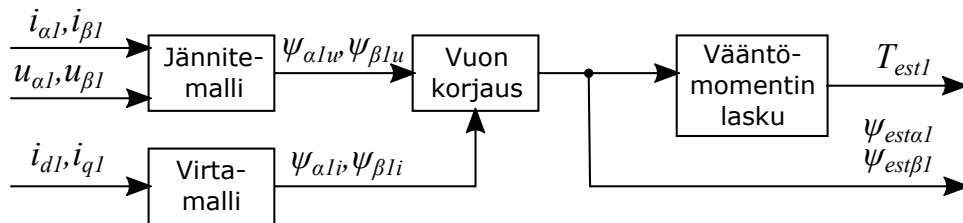
Kuvassa 20 on tarkempi esitys DTC-säädössä usein käytetystä moottorimallista [9]. DTC-säätö käyttää pääosin jännitemallia. Jännitemallissa vuo lasketaan integroimalla staattorijännitettä

$$\psi_s = \int (\mathbf{u}_s - R_s \mathbf{i}_s) dt, \quad (27)$$

missä \mathbf{u}_s on staattorin napoihin syötetty jännite ja $R_s \mathbf{i}_s$ kuvaa käänimissä syntyvää jännitehäviötä. Jännitemallin kriittinen parametri on staattoriresistanssi. Staattori-

resistanssi, kuten muutkin resistanssit, muuttuu lämpötilan funktiona, joten sitä ei tule käsitellä vakiona.

Jännitemallin vahvuudet ovat nimellisnopeuden ympäristössä, pienillä nopeuksilla vuoestimaatti vääristyy. Suurilla nopeuksilla staattoriresistanssin jännitehäviö on pieni verrattuna syöttöjännitteeseen, jolloin se voidaan jättää huomiotta. Pienillä nopeuksilla staattoriresistanssin jännitehäviön osuus staattorin kokonaisjännitteestä kasvaa ja luo virhettä vuoestimaattiin [36, 37]. Vuoestimaatin korjaamiseen voidaan käyttää virtamallia, joka valvoo jännitemallin käyttäytymistä ja tarvittaessa korjaa vuoestimaattia [37]. Tällöin virtamalli toimii taustalla ja estää vuoestimaattia vääristymästä.



Kuva 20: Erillissäädön moottorimallin tarkempi lohkokkaavio.

Kaksikäämikonekäyttö erillissäädöllä on yksinkertainen toteuttaa, eikä vaadi lisätyötä tai komponentteja verrattuna tavalliseen kolmivaihekonekäyttöön. Kaksikäämikonekäytön viansietokyky on parhaimmillaan käytettäessä erillissäätöä. Käämiryhmien magneettista kytkeytymistä lukuun ottamatta käyttö on täysin redundantti ja toisen taajuusmuuttajan vikaantuminen ei vaikuta toisen taajuusmuuttajan toimintaan. Erillissäätöä käytettäessä varmistetaan myös käämiryhmien virran tasapaino. [32, 33, 34]

4.4 Virran estimointi

Kaksikäämikoneissa yhden käämin pyrkiessä muuttamaan koneen vuota, indusoituu keskinäishajainduktanssien kautta toiseen käämiin vastakkaissuuntainen virta joka pyrkii pitämään vuon vakiona. Tällöin staattorikäämeissä kulkee vaihtosuuntaajan syöttämän virran lisäksi toisesta käämiryhmästä indusoitunut virta. Sääto toimii vain jos se pystyy erottamaan syöttövirran kokonaisvirrasta. Eli indusoitunut virta-komponentti tulisi poistaa kokonaisstaattorivirrasta. Erillissäädössä ei kuitenkaan jaeta virtatietoja säätöjen kesken, eikä siten poisteta ristikkäiskytkentymistä. Tällöin erillissäädössä vaihtosuuntaajien kytkennät vaikuttavat toistensa kytkentöihin ja aiheuttavat staattoria lämmittäviä yliaaltoja sekä rippeliä vääntömomenttiin.

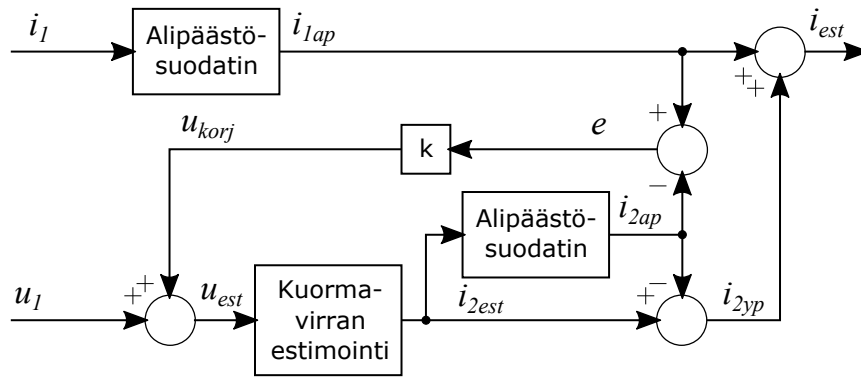
Virran estimoinnilla voidaan poistaa säätöjen ristikkäiskytkentymisen ilman, että virtatietoja jaetaan säätöjen kesken. Staattorivirta voidaan estimoida monella eri tavalla. Perusajatuksena on estimoida syöttöjännitteen ja koneen induktanssien avulla syntynyttä virtaa. Ideaalisesti virtaestimaatti vastaa täysin syötettyä virtaa eikä siinä tulisi olla muiden lähteiden rippelivirtoja. Todellisuudessa estimaatti ei koskaan ole yhtä tarkka kuin mitattu arvo. Oikein tehtynä virtaestimaatti ei kuitenkaan

sisällä indusoituneita virtakomponentteja, ja siten erillissäätöjen ristikkäiskytkenät saadaan poistettua.

Schroderus ja Heikkilä [38] patentoivat keinon virran hetkellisarvon tarkkaan estimointiin. Keksintö kehitettiin arvioimaan pitkällä kaapeleilla syötettyjen koneiden virtaa, jolloin ei tarvita erillistä virran mittausta koneen puolelta. Pitkät kaapelit aiheuttavat heijastuksia jännitteisiin ja virtoihin. Tällöin vaihtosuuntaajan läheltä mitattu syöttövirta ei vastaa sähkökoneen virtaa, jolloin säädön dynamiikka kärsii. Keksinnön (kuva 21) lopullinen virtaestimaatti (i_{est}) muodostetaan sekä mitatusta (i_1) että estimoidusta kuormavirrasta (i_{2est}). Mitattu syöttövirta alipäästösodatetaan ja läpi päästetään vain virran perusaalto (i_{1ap}). Alipäästösodatuksen tehtävä on poistaa kaikki heijastuksien aiheuttamat yliaallot virtasignaalista. Kuormavirran estimaatti lasketaan mitatun syöttöjännitteen ja tiedossa olevan kuorman impedanssin L avulla. Puhtaasti induktiiviselle kuormalle se voidaan laskea esimerkiksi

$$i_{2est}(t) = i_{2est}(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u_{est}(t) dt, \quad (28)$$

missä $i_{2est}(t_0)$ on virran estimaatin edellinen arvo ja $u_{est}(t)$ on syöttöjännitteestä sekä korjaustermistä u_{korj} lasketun jännite-estimaatin hetkellisarvo. Impedanssin arvo voidaan määrittää kerran tai sitä voidaan päivittää jatkuvasti.



Kuva 21: Virran estimoinnin lohkokkaavio.

Estimaatissa virran nopeat muutokset kuvastavat hyvin kuormavirran todellisia muutoksia, mutta integrointitermistä johtuen sen absoluuttinen arvo vääristyy ajan kuluessa. Ylipäästösuodattamalla kuormavirran estimaatti saadaan tarkka arvio kytkentätaajuisista virran komponenteista. Vain estimaatin suodatettu osa (i_{2yp}) käytetään lopulliseen hetkellisarvoon, joten estimaatin absoluuttinen arvo on merkityksetön. Kuormavirran estimaatin ylipäästösuodatus toteutetaan alipäästösuodattamalla estimaatti (i_{2ap}) ja erottamalla se estimaatista. Alipäästösuodatettua kuormavirran estimaattia käytetään korjaamaan estimaatin ryömiminen. Sitä verrataan alipäästösuodatettuun mitattuun virtaa, jolloin saadaan virhetermi e . Virhetermi kerrotaan kertoimella k , jolloin saadaan jännitteen korjaustermi u_{korj} .

Lopullinen virtaestimaatin hetkellisarvo saadaan lisäämällä mitattuun syöttövirran perusaaltoon kuormavirtaestimaatin yliaallot. Saadun virtaestimaatin perusaalto

vastaa syöttövirran perusaaltoa ja yliaallot vastaa mitatusta syöttöjännitteestä ja impedanssista laskettuja yliaaltoja.

Ideaalisessa tapauksessa kaksikäämikoneen staattorikäämien magneettinen kytkytyminen on merkityksettömän pientä ja käämiryhmien toisiinsa indusoimat virrat häviävän pieniä. Tällöin vaihtosuuntaajat eivät vaikuta toistensa toimintaan ja säädöt toimivat kuten kolmivaihekoneessa. Todellisuudessa kuitenkin koneesta riippuen kytkytyminen voi olla hyvinkin voimakasta. Tällöin käämiryhmien välille indusoituvat virrat häiritsevät säädön toimintaa ja yliaaltojen määrä lisääntyy. Käyttämällä virtaestimaattia, säädöt eivät huomaa käämiryhmien välille indusoituvia virtoja. Tällöin säädön toiminta paranee ja vaihtosuuntaajat pystyvät toimimaan itsenäisesti. Tässä työssä käytetään vääntömomentti- ja vuoestimaattien laskemiseen staattorivirran arvoa, josta viisi prosenttia on mitattua ja 95 % estimoitua. Tällöin virran estimoitu osuus vähentää rippeliä ja mitattu osuus estää estimaatin ryömimisen. Virtaestimaatin vaikutusta käytön toimintaan tarkastellaan luvussa 5.

4.5 Virtatasapaino

Kaksikäämikoneella saadaan mm. vääntömomentin ja hyötysuhteen kannalta paras suorituskky aikaiseksi kun molemmissa käämiryhmissä kulkee saman suuruiset virrat [17]. Luontainen epäsymmetria käämiryhmissä ja taajuusmuuttajissa aiheuttaa kuitenkin epätasaista virranjakoa käämiryhmien kesken kun käytetään jännitevälipiirillisiä taajuusmuuttajia yhteisellä säädöllä [39]. Kuudennen järjestysluvun vääntömomenttirippeli jota ei normaalisti epäsymmetrisessä kaksikäämikoneessa ole, syntyy virran epätasaisen jakautumisen seurauksena [17]. Epätasapaino voi myös nostaa toisen käämiryhmän virtoja liian korkealle, jolloin kone lämpenee ja inverteri saattaa suojaussyistä laueta. Bojoi ym. [39] mukaan kaksikäämikone on herkempi syötön kuin käämiryhmien parametrien epäsymmetrisyyksille [39]. Syöttöjännitteen amplitudin ja vaiheen eroista johtuva virran epätasainen jakautuminen on suurta pienellä kuormalla. Kuorman kasvaessa syöttöjännitteen vaikutus pienenee. Kuorman suuruus ei vaikuta parametrien aiheuttamaan epätasapainoon. Parametrien epäsymmetrisyyksistä johtuva virran epätasainen jakautuminen käämiryhmien välillä on yleinen ongelma virtasäädetyissä kaksikäämikonekäytöissä [40]. Virran epätasapainoon on ehdotettu useita säädöllisiä ratkaisuja [15, 40].

Singh ym. [33] käyttivät epäsymmetrisen kaksikäämioikosulkukoneen ohjaukseen kahta kolmivaihevaihtosuuntaajaa erillisillä vektorisäädöillä. Molemmat säädöt näkivät vain oman käämiryhmänsä virran sekä molempien käämiryhmien virroista lasketun kokonaisvuon. Keskinäisinduktansseja ei otettu huomioon säädössä. Vaihtosuuntaajat siis ohjasivat käämejä kuten tavallisia kolmivaihekoneen käämejä. Singh ym. huomasivat, että vektorisäädölle ominainen ongelma virran epätasaisen jakautumisen kanssa ei päde erillisäädölle. Virtatasapaino käämiryhmien välillä säilyi myös nimellisuopeuden yläpuolella eli kentänheikennysalueella.

Karttunen ym. [32] käyttivät epäsymmetrisen kaksikäämikestomagneettitahtikoneen ohjaukseen kahta kolmivaihevaihtosuuntaajaa erillisillä vektorisäädöillä. Vaihtosuuntaajat oli kytketty samaan tasajännitteeseen, jolloin molemmille käämiryhmille syötettyjen jännitepulssien amplitudit olivat yhtä suuret. Keskinäisinduktansseja

ei otettu huomioon säädössä. Karttusen ym. mukaan kaksi erillisäädettyä vaihtosuuntaajaa tasoittavat automaattisesti käämiryhmien väliset virtojen epätasapainot. Käämien epäideaalisuuksista johtuen vaihtosuuntaajat voivat syöttää käämejä toisistaan amplitudeiltaan ja vaiheiltaan poikkeavilla jännitteillä aiheuttaen kuitenkin yhtä suuret virrat. Jos staattorin virrat ovat yhtä suuret ($i_{d1} = i_{d2}$, $i_{q1} = i_{q2}$) ja käämiryhmien parametreissa (esimerkiksi R_s ja L_d) on eroja ryhmien välillä, tulee staattorijännitteiden olla eri suuret ($u_{d1} \neq u_{d2}$, $u_{q1} \neq u_{q2}$), jotta yhtälö (20) toteutuu.

Singh ym. [33] sekä Karttunen ym. [32] käyttivät kahta erillisäädettyä vaihtosuuntaajaa kaksikämmikoneen ohjaukseen. He huomasivat virtatasapainon pysyvän luonnollisesti käämiryhmien välillä, toisin kuin yhteisellä säädöllä.

4.6 Dynamiikka

Erillisäädön dynamiikkaan vaikuttaa käytettävä moottorimalli. Kaksikämmikoneen jännitemalli ei sisällä magneettisesta kytkeytymisestä johtuvia ristikkäistermejä. Siten jännitemalli vastaa täysin kolmivaihekoneen jännitemallia. Virtaestimaatin käyttö jännitemallissa estää säätöjä näkemästä toisen vaihtosuuntaajan tekemiä kytkentöjä. Pienillä pyörimisnopeuksilla virtamallin käyttö jännitemallin ryömimisen estämiseen heikentää säädön dynamiikkaa johtuen ristikkäistermien puuttumisesta erillisäädön virtamallista.

4.6.1 Virtamalli

Kun kaksikämmikoneen jänniteyhtälöistä (20) erottaa myös tavallista kolmivaihekonetta kuvaavat termit, jää jäljelle ainoastaan käämiryhmien välistä magneettista kytkeytymistä kuvaavat termit

$$\begin{cases} u_{d1,kyt} = M_d \frac{di_{d2}}{dt} - \omega M_q i_{q2} \\ u_{q1,kyt} = M_q \frac{di_{q2}}{dt} + \omega M_d i_{d2} \\ u_{d2,kyt} = M_d \frac{di_{d1}}{dt} - \omega M_q i_{q1} \\ u_{q2,kyt} = M_q \frac{di_{q1}}{dt} + \omega M_d i_{d1} \end{cases} . \quad (29)$$

Nämä termit kuvaavat käämiryhmien toisiinsa indusoimia jännitteitä, joilla ne pyrkivät vastustamaan toisessa käämissä tapahtuvaa vuon muutosta. Vektorisäädön virtamallia käytettäessä nämä termit tulisi syöttää positiivisena takaisinkytkentänä toisen taajuusmuuttajan säätöön, jotta jänniteyhtälöiden (20) ristikkäinen kytkeytyminen saataisiin poistettua. Näin ei kuitenkaan tehdä erillisäädössä. Karttunen ym. [32] kuitenkin huomasivat, että erillisäädössä käämien magneettinen kytkeytyminen vaikuttaa säädössä vain dynaamiseen käyttäytymiseen. Virheetön pysyvä tila virtaohjeeseen nähden saavutetaan myös ilman jänniteyhtälöiden magneettista kytkeytymistä kuvaavia termejä (29).

Kaksikämmikoneen kaksiakselimallin vääntömomenttiyhtälön käämiryhmien välistä magneettista kytkeytymistä kuvaavaa termiä ei esiinny kahden erillisäädetyin taajuusmuuttajan virtamallin kokonaisvääntömomenttiestimaatissa, jota voidaan

arvioida yhtälöllä

$$T_{est,tot} = T_{est1} + T_{est2} = \frac{3}{2}p[\psi_{PM}(i_{q1} + i_{q2}) + (L_d - L_q)(i_{d1}i_{q1} + i_{d2}i_{q2})], \quad (30)$$

missä T_{est1} on ensimmäisen ja T_{est2} toisen taajuusmuuttajan vääntömomenttiestimaatti. Erillissäädössä virtamallin vääntömomenttiestimaatti ei siis ole täysin tarkka jos kaksikäämikoneen roottori on avonapainen ja virtojen pitkittäiskomponentit ovat nollasta poikkeavia. Nopeussäätäjä korjaa vääntömomenttiestimaatin virheen pysyvässä tilassa, mutta dynaamisen tilan virhettä se ei ehdi korjaamaan. Karttusen ym. [32] mukaan magneettista kytkeytymistä kuvaava termi on kuitenkin yleensä suhteellisen pieni ja estimaatti on riittävä moniin sovelluksiin.

Erillissäädetyn DTC-säädön virtamallissa vuoestimaatti lasketaan yhtälöillä

$$\begin{cases} \psi_{estd1} = L_d i_{d1} + \psi_{PM} \\ \psi_{estq1} = L_q i_{q1} \\ \psi_{estd2} = L_d i_{d2} + \psi_{PM} \\ \psi_{estq2} = L_q i_{q2} \end{cases} \quad (31)$$

Kaksikäämikoneen kaksiakselimalliin verrattuna erillissäädön vuoestimaatista puuttuu siten termit $M_d i_{d2}$, $M_q i_{q2}$, $M_d i_{d1}$ sekä $M_q i_{q1}$. Termien puuttuminen vaikuttaa sekä dynaamiseen että pysyvään tilaan. Kuvassa 22 on esitetty kaksikäämikoneen käämivuon vektoridiagrammi mustalla värillä. Vektoreiden kokoa on liioiteltu ja todellisuudessa hajavoiden vektorit ovat huomattavasti pienempiä. Sinisellä värillä on merkitty erillissäädön virtamallin muodostama yhden käämiryhmän vuoestimaattivektori ψ_{est1} . Huomataan, että erillissäädön estimaatti ei vastaa todellista vuota ψ_{s1} . Estimaatin pitkittäiskomponentti on suurempi kuin todellisen arvon, joten säätö pyrkii pienentämään koneen magnetointia. Poikittaiskomponentti taas on pienempi kuin todellinen arvo, joten säätö pyrkii kasvattamaan vääntömomenttia. Erillissäädön virtamallin dynamiikkaa voidaan parantaa esimerkiksi parametrikorjauksilla. Tällöin tietyllä vakiolla voidaan yrittää paikata magneettista kytkeytymistä kuvaavien termien puuttumista. Virtaestimaatin käyttö ei vaikuta virtamallin dynamiikkaan.

4.6.2 Jännitemalli

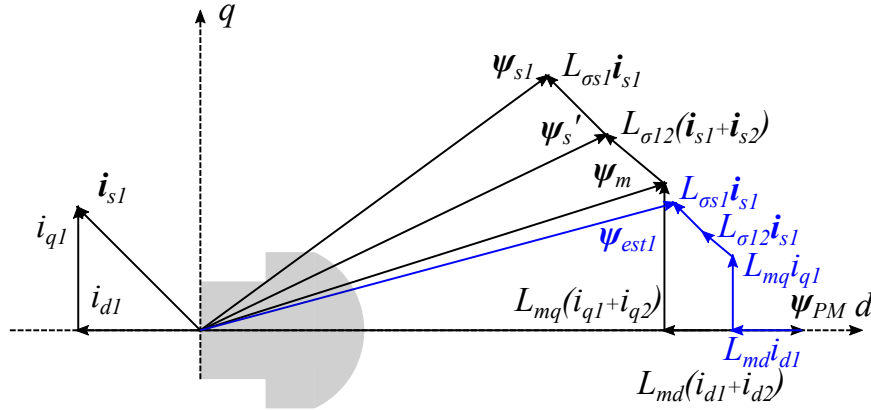
Virtaestimoidun jännitemallin vuoestimaatti lasketaan mitatun virran sijaan virtaestimaatilla

$$\psi_{est1} = \int (\mathbf{u}_{s1} - R_s \mathbf{i}_{est1}) dt. \quad (32)$$

Roottorin asennosta riippuvaisien induktanssien arvojen takia virtamallissa vääntömomenttiestimaatti lasketaan roottorikoordinaatistossa. Jännitemallissa vuo lasketaan staattorikoordinaatistossa. Virtaestimoidun jännitemallin vääntömomenttiestimaatti saadaan vuo- ja virtaestimaattivektorin ristitulosta

$$T_{est1} = \frac{3}{2}p(\psi_{est1} \times \mathbf{i}_{est1}). \quad (33)$$

Toisin kuin virtamallissa, jännitemalli ei sisällä induktansseja. Virtaestimoidulla jännitemallilla käämiryhmien välillä ei ole kytkeytymistä eli yhtälöt vastaavat täysin



Kuva 22: Kaksikämmikestomagneettitahtikoneen vektoridiagrammi. Mustalla on merkitty koneen todelliset arvot ja sinisellä erillissäädön virtamallin näkemä vuo. ψ_m on ilma välivuon vektori. ψ_s' on staattorin hajainduktanssien ja keskinäishajainduktanssin välin vuovektori. Vektoreiden kokoa on liioiteltu.

kolmivaihekoneen yhtälöitä. Ideaalisessa tapauksessa virtaestimaatti vastaa staattoriin syötettyä todellista virtaa. Tällöin vuoestimaatti yhtälössä (32) vastaa koneen todellista vuota ψ_{s1} (kuva 22). Vuo- ja virtaestimaatin ollessa tarkkoja myös vääntömomenttiestimaatti yhtälössä (33) on tarkka. Ideaalisen virtaestimaatin tapauksessa jännitemallinnettu erillissäätö kärsii vain tavallisista myös kolmivaihekoneille tutuista virheistä kuten staattoriresistanssin epätarkkuudesta ja pienien nopeuksien vuoestimaatin ryörimisestä.

Todellisuudessa virtaestimaatti ei kuitenkaan ole täysin tarkka. Suurilla nopeuksilla staattoriresistanssin jännitehäviö on pieni verrattuna syöttöjännitteeseen, jolloin virtaestimaatin tarkkuudella ei kuitenkaan ole vaikutusta jännitemallin vuoestimaattiin. Suurilla nopeuksilla vuoestimaatti on lähes virheetön jännitemallinnetussa erillissäädössä. Pienillä nopeuksilla jännitemallin ryöriminen estetään usein virtamallin avulla. Erillissäädöllä virtamallin vuoestimaatista puuttuu kämmiryhmien kytkeytymistä kuvaavat termit yhtälössä (31). Tällöin vuoestimaattiin syntyy virhettä sekä virtaestimaatista että virtamallin puutteellisuuden takia.

Erillissäädön jännitemallin vääntömomenttiestimaatin tarkkuus riippuu täysin vuoestimaatin sekä virtaestimaatin tarkkuudesta. Suurilla pyörimisnopeuksilla vuoestimaatti on tarkka ja vääntömomentin tarkkuus riippuu siten virtaestimaatin tarkkuudesta. Matalilla nopeuksilla vuoestimaatin epätarkkuus heijastuu myös vääntömomentin tarkkuuteen.

Pelkällä virtamallilla erillissäädön dynamiikka on virheellinen, johtuen keskinäisinduktanssin sisältävien kytkeytymistermien puutteesta. Virtaestimoidun jännitemallin dynamiikka erillissäädetyssä kaksikämmikoneessa on teoreettisesti lähes yhtä virheetön kuin kolmivaihekoneen jännitemallin dynamiikka. Tämän teorian todistaminen jää kuitenkin tämän työn rajauksen ulkopuolelle.

4.7 Yliaallot

Kaksikäämikoneessa käämiryhmien välisiä kiertäviä yliaaltoja järjestyslukua $k = 6n \pm 1$, $n = 1, 3, 5, \dots$ rajoittaa vain pieni staattorin hajainduktanssi [4, 17, 28, 35]. Tällöin pienikin heräte aiheuttaa huomattavia kyseisen järjestysluvun yliaaltoja staattorivirrassa. Epäsymmetrisessä kaksikäämikoneessa nämä yliaallot eivät vaikuta ilmapälvuohon, joten ne eivät aiheuta vääntömomenttirippeliä [4, 17]. Ne ovat kuitenkin haitallisia johtuen niiden aiheuttamasta koneen lämpenemisestä. Kaksikäämikoneen staattorivirran yliaaltoja aiheuttavat vaihtosuuntaajat [4] sekä itse kone [35, 33]. Vaihtosuuntaajat voivat aiheuttaa suuria virran yliaaltoja jos syöttöjännite sisältää paljon järjestyslukua $k = 6n \pm 1$, $n = 1, 3, 5, \dots$ olevia yliaaltoja. Korkeilla kytkentätaajuuksilla näin ei kuitenkaan ole, eikä kaksi erillissäädettyä vaihtosuuntaajaa aiheuta ylimääräisiä järjestysluvun $k = 6n \pm 1$, $n = 1, 3, 5, \dots$ yliaaltoja kun kytkentätaajuus on useita tuhansia hertsejä [32].

Suurin syy virran matalille harmonisille on koneen rakenne. Kestomagneettikoneen kestopagneetit eivät tuota puhdasta sinimuotoista vuota, johtuen avonapaisuudesta, urien muodosta sekä kyllästymisestä [17, 28]. Nämä harvoin aiheuttavat ongelmia perinteisissä kolmivaihekoneissa, mutta epäsymmetrisissä kaksikäämikoneissa erillisten käämien vakoluku on pieni. Tällöin käämikertoimet ovat suuret järjestysluvun $k = 6n \pm 1$, $n = 1, 3, 5, \dots$ yliaalloille. Vektoriavaruushajotelmaa käyttäen pystytään (μ_1, μ_2) aliavaruuden yliaaltoja järjestyslukua $k = 6n \pm 1$, $n = 1, 3, 5, \dots$ kompensoimaan pois [10, 35]. Kaksikäämikoneen kaksiakselimallia tai erillissäätöä käyttäen näihin yliaaltoihin ei voida vaikuttaa.

Mitattu staattorivirta sisältää sekä käämiin syötetyn jännitteen synnyttämän virran että toisesta käämiryhmästä indusoituneen rippelivirran. Erillissäädetyt vaihtosuuntaajat eivät erottele syötettyjä virtoja ja indusoituneita rippelivirtoja toisistaan. Tällöin vaihtosuuntaajat reagoivat toistensa toimintaan ja aiheuttavat korkea-
taajuisia yliaaltoja. Nämä yliaallot kiertävät staattorin hajainduktanssien kautta taajuusmuuttajien välillä ja aiheuttavat lisähäviöitä. Virtaestimaattia käyttämällä taajuusmuuttajat näkevät vain syöttämänsä jännitteen aiheuttaman virran eivätkä huomaa toisen käämiryhmän yliaaltoja. Tällöin erillissäädetyt taajuusmuuttajat eivät lisää koneeseen yliaaltoja.

4.8 Suhteellisarvot

Tahtikoneiden parametrit ilmoitetaan yleensä suhteellisarvoina. Yksiköttömillä suhteellisarvoilla (englanniksi per unit, pu) saadaan sähkökoneen yhtälöitä yksinkertaistettua ja niiden laskentaa nopeutettua. Suhteellisarvo x_{pu} on suureen absoluuttinen SI-järjestelmän arvo X jaettuna sen perusarvolla X_B

$$x_{pu} = \frac{X}{X_B}. \quad (34)$$

Jännitteen, virran ja kulmataajuuden perusarvot saadaan standardi IEC-60034-10 esittämällä tavalla. Epäsymmetrisen kaksikäämikoneiden kohdalla voidaan käyttää kolmivaiheisen suhteellisarvojärjestelmän tilalla kuusivaiheista järjestelmää [26].

Tässä työssä käsitellään kuitenkin staattorikäämiryhmiä erillisinä kolmivaihejärjestelminä, joten myös suhteellisarvoja käsitellään perinteisellä kolmivaihejärjestelmällä.

Jännitteiden ja virtojen perusarvot ovat vaihesuureiden huippuarvoja. Kaksikämmikoneen jännitteen perusarvo saadaan standardista IEC-60034-10

$$U_B = \sqrt{\frac{2}{3}} U_N, \quad (35)$$

missä U_N on tehollisen vaihejännitteen nimellisarvo yhdessä käämiryhmässä. Kaksikämmikoneen vaihevirran suhteellisarvo poikkeaa standardista, sillä sen suhteellisarvo on 0,5 pu nimelliskuormalla

$$I_B = \sqrt{2} \cdot 2I_N, \quad (36)$$

missä I_N on tehollisen vaihevirran nimellisarvo yhdessä käämiryhmässä. Kulmataajuuden perusarvoksi saadaan

$$\omega_B = 2\pi f_N, \quad (37)$$

missä f_N on staattorijännitteen taajuus kun kone pyörii kentänheikennysnopeudella. Kentänheikennysnopeus on koneen matalin nopeus nimellisjännitteellä [26]. Muiden suureiden perusarvot saadaan edellä olevista arvoista

$$\begin{aligned} S_B &= \frac{3}{2} U_B I_B \\ T_B &= p \frac{S_B}{\omega_B} \\ R_B &= \frac{U_B}{I_B} \\ L_B &= \frac{U_B}{\omega_B I_B}. \end{aligned} \quad (38)$$

Suhteellisarvojärjestelmässä myös aika on suhteellinen. Sähkökoneiden simuloinneissa ja säätöjärjestelmissä käytetään yleensä kuitenkin ajan todellisia arvoja suhteellisten sijaan. Tällöin ajan suhteen muuttuvat suureet tulee jakaa kulmataajuuden perusarvolla [26].

5 Mittaukset

Erillissäädön vaikutusta kaksikäämikoneen yliaaltoihin, häviöihin sekä jännitepiikkeihin tutkittiin laboratorio-olosuhteissa kaksikäämikestomagneettitahtikoneella. Mittauksissa käytetyn koneen staattori on rakennettu 12 osakäämistä, joten jokaiselle kuudelle vaiheelle on kaksi osakäämiä. Nämä osakäämit voidaan kytkeä joko sarjaan tai rinnan. Tällöin koneelle voidaan tehdä useita erilaisia kytkentöjä. Kone oli jäniteistämätön eli sen käämitysaskel oli 1. Mittauksien kytkennät 30° vaihesiirrolla (YY30) ja ilman vaihesiirtoa (YY0) vastaavat siis kuvia 8a sekä 6a.

Erillissäätö ei erottele keskinäisinduktansseja muista induktansseista. Kuitenkin keskinäisinduktanssin arvo on hyvä tietää, sillä se auttaa ymmärtämään koneen käyttäytymistä. Ensimmäisessä alaluvussa on esitetty kaksikäämikestomagneettitahtikoneen keskinäisinduktanssin ja staattorin hajainduktanssin mittausjärjestelyt sekä tulokset. Tämän jälkeen esitellään erillissäädetyn epäsymmetrisen kaksikäämikoneen mittausjärjestelyt ja tulokset.

Taulukossa 2 on mittauksissa käytetyn koneen kilpitiedot 30° vaihesiirrolle. Taulukossa 3 on koneen parametrit. Kyseisen koneen kestomagneetit ovat suunniteltua voimakkaammat ja niiden luoma vuontiheys erittäin korkea. Staattoriselkä on liian ohut jolloin siellä on korkea vuontiheys. Tästä johtuen runkoon indusoituu pyörrevirtoja ja kone lämpenee hyvin nopeasti. Konetta jouduttiin siten pyörittämään alhaisilla nopeuksilla.

Taulukko 2: Epäsymmetrisen kaksikäämikestomagneettitahtikoneen kilpitiedot.

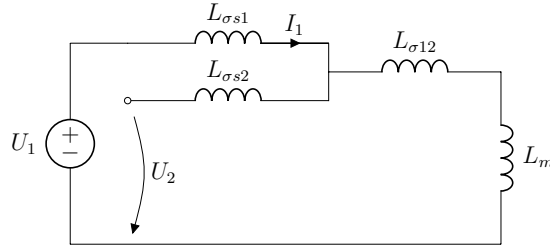
Kytkenä	YY30
Nimellisteho [kW]	60
Nimellisjännite [V]	500
Nimellisvirta [A]	38
Nimellisa nopeus [rpm]	884
$\cos \varphi$	0,98

Taulukko 3: Epäsymmetrisen kaksikäämikestomagneettitahtikoneen parametrit.

Kytkenä	YY30
Napapariluku	2
Staattoriresistanssi [Ω]	0,35
Pitkittäisinduktanssi [mH]	15,9
Poikittäisinduktanssi [mH]	22,3

5.1 Induktanssien mittaus

Kaksikäämikoneen keskinäisinduktanssin suhde itseinduktanssiin saadaan laskettua jännitteiden avulla kuvan 23 mukaan kun toinen käämi on avoin. Toisin kuin kappaleessa 3.1.3 esitetyissä elementtimenetelmälaskuissa, tässä työssä induktanssien

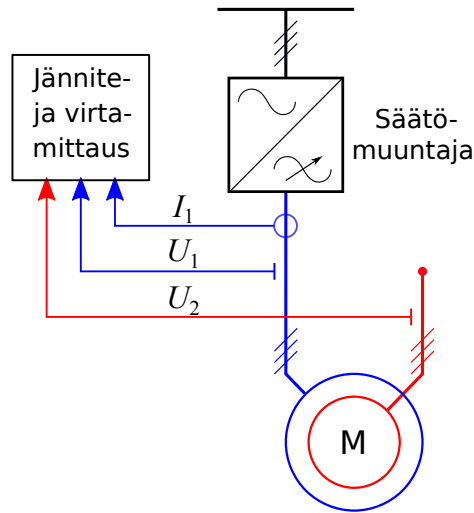


Kuva 23: Pysyvän tilan sijaiskytkentä kun toinen käämi on avoin.

mittaukset tehtiin roottorin kanssa. Tällöin magnetointi-induktanssi L_m lisätään yhtälöön (5)

$$\frac{M}{L_s} = \frac{L_{\sigma 12} + L_m}{L_{\sigma 12} + L_m + L_{\sigma s}} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (39)$$

Mittauksia tehtiin kaksi, ensimmäinen tehtiin staattorikäämien ollessa 30° vaihe-siirrossa toisiinsa nähden ja toinen ilman vaihesiirtoa. Konetta syötettiin säätömuuntajalla ja jännitteet sekä virrat mitattiin. Kuvassa 24 on esitetty mittausjärjestelyt. Verkkoon kytketyllä säätömuuntajalla syötettiin yhtä staattorikäämiryhmää toisen



Kuva 24: Keskinäisinduktanssin mittausjärjestelyt kun kaksikäänikonetta syötetään säätömuuntajalla.

käämiryhmän ollessa avoin. Taulukossa 4 on lueteltu mittauksissa käytetyt mittalaitteet. Jännitteet mitattiin Fluke yleismittarilla molemmista käämiryhmistä. Säätömuuntajalla syötetyn käämiryhmän virrat mitattiin virtapihtimittarilla. Käämien induktanssit oletettiin yhtä suuriksi. Itseinduktanssi L_s saadaan laskettua kun tiedetään käämin yli oleva jännite, sen taajuus f , käämin resistanssi ja siinä kulkeva virta

$$L_s = \frac{\sqrt{\frac{U_1^2}{I_1^2} - R_s^2}}{2\pi f}. \quad (40)$$

Taulukko 4: Induktanssien mittauksissa käytetyt mittalaitteet.

Virtapihtimittari	Amprobe ACD-31P
Max virta	1000 A
Tarkkuus	$\pm (1,0 \% + 5)$ True RMS
Yleismittari	Fluke 87 V
Max jännite	1 kV
Tarkkuus	$\pm (0,7 \% + 2)$ True RMS
AC-kaistanleveys	20 kHz
Max erottelukyky	0,1 mV

Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty mittausten tulokset.

Taulukko 5: Keskinäisinduktanssin mittaustulokset 30° vaihesiirrolla.

U_1 [pu]	U_2 [pu]	I_1 [pu]	U_2/U_1	L_s [pu]	M [pu]	L_{ss} [pu]
0,03	0,02	0,04	0,74	0,44	0,33	0,11
0,06	0,04	0,08	0,74	0,46	0,35	0,12
0,08	0,06	0,09	0,75	0,47	0,35	0,12
0,13	0,10	0,15	0,75	0,49	0,37	0,12
0,16	0,12	0,19	0,75	0,49	0,36	0,12
0,19	0,14	0,23	0,75	0,49	0,37	0,12
0,22	0,17	0,26	0,75	0,50	0,37	0,12
0,25	0,19	0,30	0,75	0,50	0,38	0,12
0,28	0,22	0,33	0,76	0,50	0,38	0,12
0,32	0,25	0,38	0,76	0,51	0,38	0,12

Taulukko 6: Keskinäisinduktanssin mittaustulokset vaihesiirron ollessa nolla.

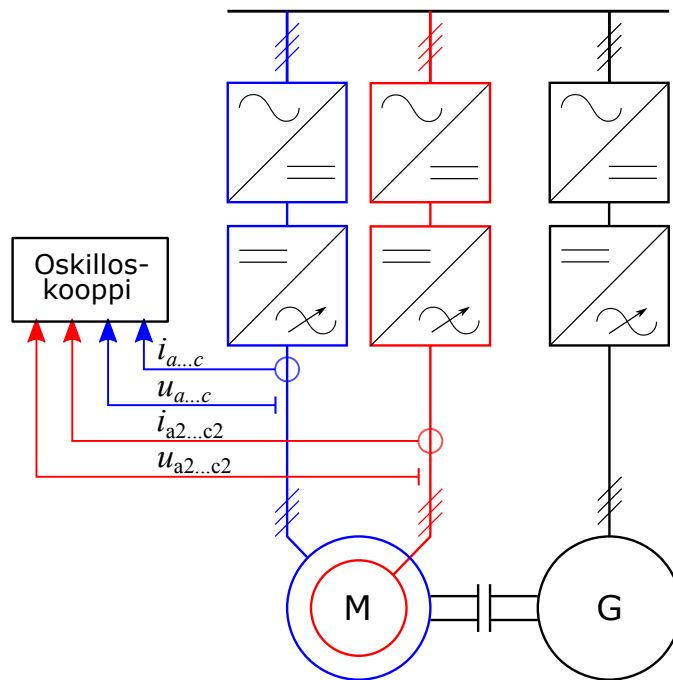
U_1 [pu]	U_2 [pu]	I_1 [pu]	U_2/U_1	L_s [pu]	M [pu]	L_{ss} [pu]
0,11	0,10	0,04	0,94	0,81	0,76	0,05
0,13	0,13	0,05	0,94	0,82	0,77	0,05
0,16	0,15	0,06	0,94	0,83	0,77	0,05
0,18	0,17	0,06	0,94	0,83	0,78	0,05
0,21	0,19	0,07	0,94	0,84	0,78	0,05
0,23	0,22	0,08	0,94	0,84	0,79	0,05
0,26	0,24	0,09	0,94	0,84	0,79	0,05
0,28	0,26	0,10	0,94	0,85	0,79	0,05
0,30	0,29	0,11	0,94	0,85	0,79	0,05
0,33	0,31	0,11	0,94	0,85	0,80	0,05

Keskinäisinduktanssin ja itseinduktanssin suhteeksi saadaan 30° vaihesiirrolla 0,75 ja ilman vaihesiirtoa 0,94. Nämä tulokset eivät ole suoraan verrattavissa taulukon 1 tuloksiin, jotka oli saatu pelkällä staattorilla. Voidaan kuitenkin huomata vaihesiirron odotettu vaikutus tuloksiin. Pieni muuntosuhde kertoo siitä, että käämiryhmien välinen kytkettyminen on pientä ja staattorin hajainduktanssi on suuri. Korkea muuntosuhde taas päinvastoin kertoo siitä, että käämiryhmien välinen kytkettyminen on korkea ja staattorin hajainduktanssi on pieni. Staattorin hajainduktanssi on ainoa tekijä rajoittamassa taajuusmuuttajien välillä kiertäviä korkeataajuisia yliaaltoja.

Mitatun kaksikämmikestomagneettitahtikoneen staattorin hajainduktanssi 30° vaihesiirrolla on 0,12 pu. Vaihesiirron ollessa nolla staattorin hajainduktanssi on hyvin pieni (0,05 pu). Pieni hajainduktanssi ei rajoita kaksikämmikoneille tyypillisiä korkeataajuisia yliaaltoja ja siten kone lämpenee ja säädön toiminta vaikeutuu.

5.2 Epäsymmetrisen kaksikämmikoneen erillissäätö

Kuvassa 25 on esitetty epäsymmetrisen kaksikämmikestomagneettitahtikoneen mittauksissa käytetty järjestelmä ja mittausjärjestelyt. Kahdella taajuusmuuttajalla syötettyä kaksikämmikoneetta (M) jarrutetaan kuormakoneella (G). Tällöin kaksikämmikone toimi moottorina ja kuormakone generaattorina. Kaksikämmikoneen taajuusmuuttajille syötettiin momenttiohjeet ja kuormakone toimi nopeussäädöllä. Ensimmäiset mittaukset tehtiin yhdellä vaihtosuuntaajalla. Tällöin vain toinen käämiryhmä oli siis käytössä. Saatuihin tuloksiin verrattiin kahden vaihtosuuntaajan samanaikaista käyttöä erillissäädössä sekä virtaestimattia käyttäen että ilman. Eri toimintapisteissä mitattiin antureilla toisen vaihtosuuntaajan syöttämät vaihejännitteet $u_{a...c}$ ja virrat $i_{a...c}$ ja tiedot syötettiin oskilloskoopille. Mittaukset tehtiin 12,5 MHz näytteenottotaajuuksella, yhden sekunnin näytteenottoajalla ja täydellä kais-tanleveydellä. Kaikki mittaukset tehtiin pysyvässä tilassa. Taulukossa 7 on lueteltu mittauksissa käytetyt mittalaitteet.



Kuva 25: Kaksikämmikoneen erillissäädön mittausjärjestelyt.

Mittauksissa käytetyt koneen toimintapisteet on numeroitu taulukon 8 mukaan vastaamaan tiettyä pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia. Koneen kuormitus kasvaa toimintapisteiden mukana. Vääntömomentti T vastaa yhden taajuusmuuttajan

Taulukko 7: Erillissäädetyin kaksikämmästä magnetitaitikoneen mittauksissa käytetyt mittalaitteet.

Vaihtosuuntaaja	ABB ACS880-104
Max virta	110 A
Kytkeäntaajuus	0-3 kHz
Oskilloskooppi	Yokogawa DLM 4058
Kaistanleveys	500 MHz
Max näytteenottotaajuus	1,25 GHz
Virta-anturi	Keysight 1146B Current Probe
Max virta	100 A
Kaistanleveys	100 kHz
Herkkyys	100,0 mV/A
Jänniteanturi	Yokogawa 701926 Differential Probe
Max jännite	7 kV
Kaistanleveys	50 Mhz

vääntömomenttiohjetta. Yhden vaihtosuuntaajan tapauksessa koneen kokonaisvääntömomentti oli siten puolet erillissäädetyistä tapauksista.

Taulukko 8: Mittauksissa käytetyt toimintapisteet.

Toimintapiste	n [pu]	T [pu]
1	0,22	0,20
2	0,33	0,20
3	0,45	0,20
4	0,22	0,35
5	0,33	0,35
6	0,45	0,35
7	0,22	0,50
8	0,33	0,50
9	0,45	0,50
10	0,22	0,65
11	0,33	0,65
12	0,45	0,65
13	0,22	0,80
14	0,33	0,80
15	0,45	0,80

Erillissäätö ei ota huomioon magnetista kytketymistä staattorikämmien välillä ja siten taajuusmuuttajat näkevät vain oman kolmivaihekkäimiryhmänsä. Tällöin pystyttiin käyttämään taajuusmuuttajiin sisäänrakennettua identifointiajoa tarvittavien koneen parametrien määrittämiseen. Parametrien identifointiajo on automaattinen mittausten sarja ja se suoritetaan joko roottorin ollessa paikallaan tai koneen tyhjäkäynnissä. Identifointiajo suoritettiin molemmille taajuusmuuttajille erikseen. Samanaikainen identifointiajo olisi häirinnyt mittauksia ja luonut virhettä tuloksiin.

5.2.1 Vääntömomenttirippeli

Erillissäädön aiheuttamaa vääntömomenttirippeliä tutkittiin laskemalla koneen il-mavälitehoa eri ohjaustavoilla. Jos erillissäätö aiheuttaisi vääntömomenttirippeliä, jota ei muuten epäsymmetrisissä kaksikäämikoneissa synny, voitaisiin se huomata koneen mekaaniseen työhön käyttämän sähköisen tehon avulla. Tarkempi keino rip-pelin arvioimiseen olisi suora vääntömomentin mittaaminen anturilla, mutta tämän työn kannalta staattorivirran ja -jännitteen mittaaminen on riittävää.

Vaihejännitteet mitattiin maata vasten, joten niissä oli mukana yhteismuotoinen jännite. Yhteismuotoinen jännite syntyy maan ja vaihejohtimien välille, sillä vaihto-suuntaajalla syötettyjen vaihejännitteiden hetkellinen summa poikkeaa nolasta [41]. Yhteismuodon hetkellisarvo on

$$u_{yhteis}(t) = \frac{1}{3}[u_a(t) + u_b(t) + u_c(t)]. \quad (41)$$

Mitatuista jännitteistä voidaan poistaa yhteismuoto esimerkiksi matriisimuunnoksella

$$\begin{bmatrix} u'_a(t) \\ u'_b(t) \\ u'_c(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} \quad (42)$$

missä $u'_{a\dots c}$ ovat muunnetut vaihejännitteiden hetkellisarvot [42].

Yhteismuotoinen virta syntyy yhteismuotoisen jännitteen ja sähkökoneen sekä kaapelien kapasitanssien seurauksena. Kapasitanssit tarjoavat matalaimpedanssisia reittejä korkeataajuisille virroille. Yhteismuotoinen virta saadaan poistettua vaihe-irroista käyttäen samaa muunnosmatriisia kuin vaihejännitteillä. Vaihtosuuntaajan syöttämä koneen mekaaniseen työhön käyttämä sähköteho saadaan laskettua tehollisarvoistetuista vaihejännitteistä $U'_{a\dots c}$ sekä vaihevirtojen perusaalloista $I'_{a1\dots c1}$

$$P_{\text{syöttö}} = U'_a I'_{a1} + U'_b I'_{b1} + U'_c I'_{c1}. \quad (43)$$

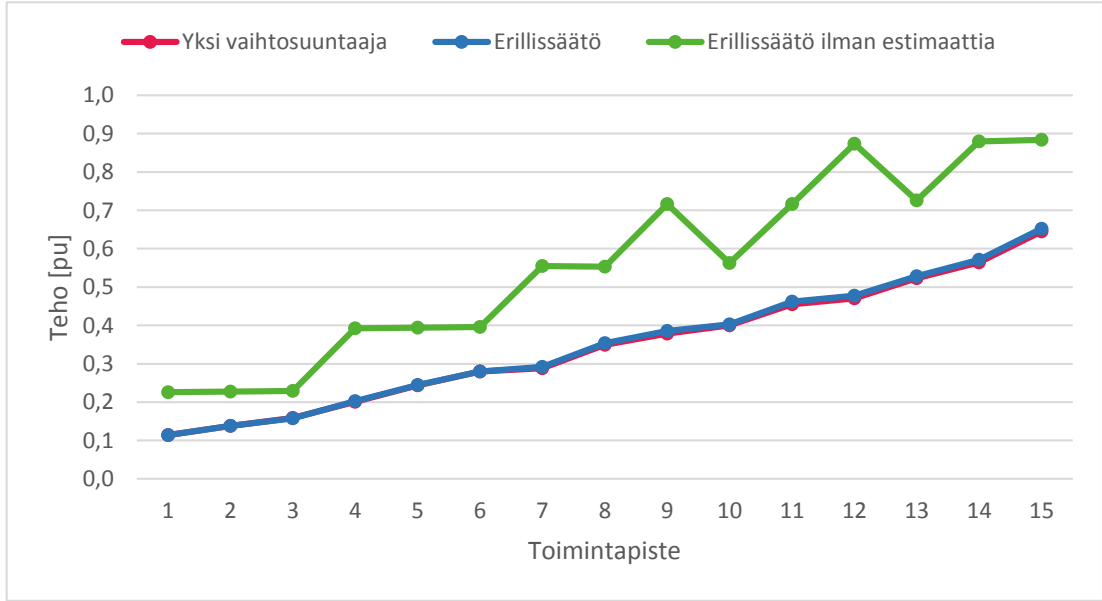
Kuvassa 26 on esitetty eri toimintapisteissä yhden vaihtosuuntaajan koneeseen syöttämä teho kun konetta käytettiin yhdellä vaihtosuuntaajalla sekä kun konetta käytettiin kahdella erillissäädetyillä vaihtosuuntaajilla. Erillissäädetyistä tapauksesta mitattiin sekä virtaestimaatin että pelkän mitatun virran käyttö.

Huomataan, että virtaestimaattia käyttämällä erillissäädön tehot vastaavat hyvin yhden vaihtosuuntaajan tapauksen tehoja, eikä siten aiheuta yliaaltoja vääntömo-menttiin. Ilman virtaestimaattia erillissäädön tehot ovat huomattavasti korkeammat. Ilman virtaestimaattia säädöt häiritsevät toisiaan, jolloin ne eivät toimi oikein ja siten aiheuttavat vääntömomenttirippeliä.

5.2.2 Virtahäviöt

Virtahäviöt tarkoittavat virrallisten käämien eli kestopagneettitahtikoneissa staatto-rikäämien resistiivisiä häviöitä. Virtahäviöitä kutsutaan myös kuparihäviöiksi ja ne kasvavat virran neliössä

$$P_{cu} = 3R_s I_a^2. \quad (44)$$



Kuva 26: Koneen mekaaniseen työhön käyttämä sähköinen teho.

Johtimien (tässä kuparia) resistanssi ei kuitenkaan ole vakio vaan muuttuu lämpötilan funktiona

$$R_{s,2} = R_{s,1} \frac{T_2 + 235^\circ\text{C}}{T_1 + 235^\circ\text{C}}, \quad (45)$$

missä T_2 on toimintapisteen lämpötila, T_1 on huoneen lämpötila ja $R_{s,1}$ on staattorin nimellisresistanssi [18]. Lämpötilan noustessa resistanssi ja siten virtahäviöt kasvavat. Tyypillisesti johtimien resistanssin arvo lasketaan lämpötilalle, joka saavutetaan sähkökoneen jatkuvassa tilassa. Tällöin voidaan olettaa resistanssin pysyvän ainakin suurimman osan ajasta lasketun arvon lähetyvillä [43]. Resistanssin suuruuteen vaikuttaa vaihtovirralla myös taajuus, johtuen virranahdosta. Virranahdon vaikutus on sitä suurempi, mitä enemmän virtaa kulkee yhdessä johtimessa. Tässä työssä käytetyn koneen käämitykset on tehty niin sanotuista Litz-johtimista, jotka koostuvat useasta ohuesta langasta. Tällöin virta jakaantuu tasaisesti usealle langalle ja virranahdon vaikutus jää pieneksi.

Eri ohjaustavoilla syntyvät virtahäviöt on esitetty kuvassa 27. Virtahäviöt erillissäädöllä ovat keskiarvoisesti noin yhdeksän prosenttia korkeammat kuin yhden taajuusmuuttajan tapauksessa. Kuormituksen kasvaessa virran yliaaltojen osuus virtahäviöistä pienenee, joten erillissäädön ja yhden taajuusmuuttajan välinen suhde pienenee kuormituksen kasvaessa. Toimintapisteessä 15 virtaestimoidun erillissäädön virtahäviöt ovat enää neljä prosenttia korkeammat kuin yhdellä taajuusmuuttajalla ajettaessa. Ilman virtaestimaattia erillissäädön virtahäviöt ovat huomattavasti korkeammat.

5.2.3 Kokonaisharmoninen särö

Kuvassa 28 on eri ohjaustavoilla staattorivirran muodot. Ilman virtaestimaattia huomataan erillissäädössä huomattava määrä korkean taajuuden yliaaltoja. Virtaesti-

maatin käyttö vähentää näitä yliaaltoja huomattavasti. Virtaestimoidun erillissäädön käyrästä huomataan voimakas viides yliaalto.

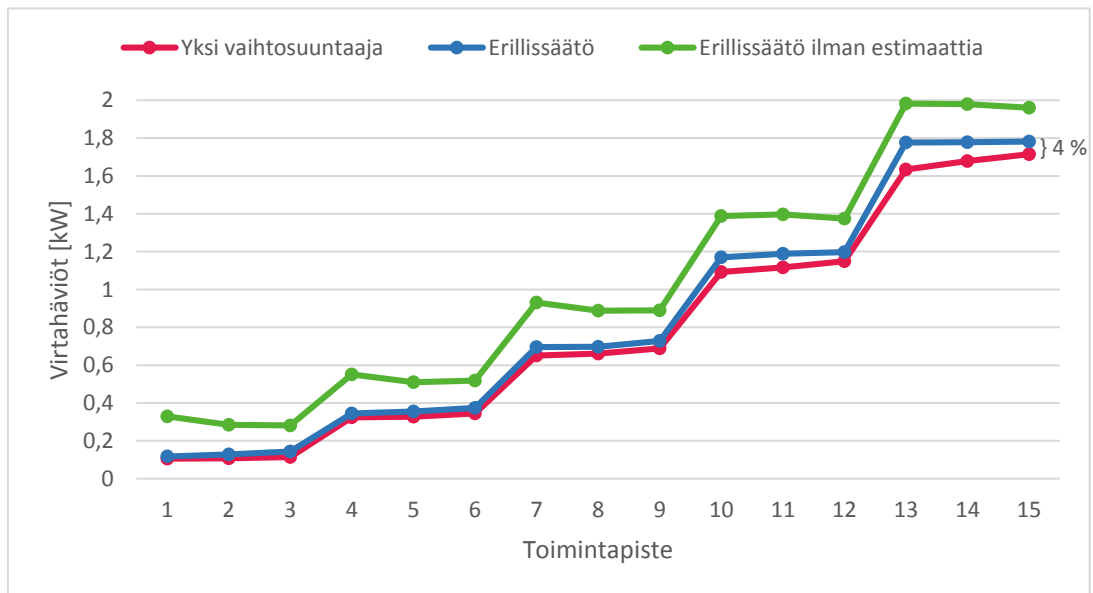
Kokonaisharmoniseksi säröksi (englanniksi total harmonic distortion, THD) kutsutaan yliaaltojen amplitudien suhdetta perusaallon amplitudiin. Virran särö lasketaan tässä työssä suhteutettuna virran nimellisarvoon. Tällöin särö on paremmin vertailtavissa eri toimintapisteissä. Virran kokonaisharmoniseksi säröksi saadaan tällöin

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}}{I_N} \cdot 100\%, \quad (46)$$

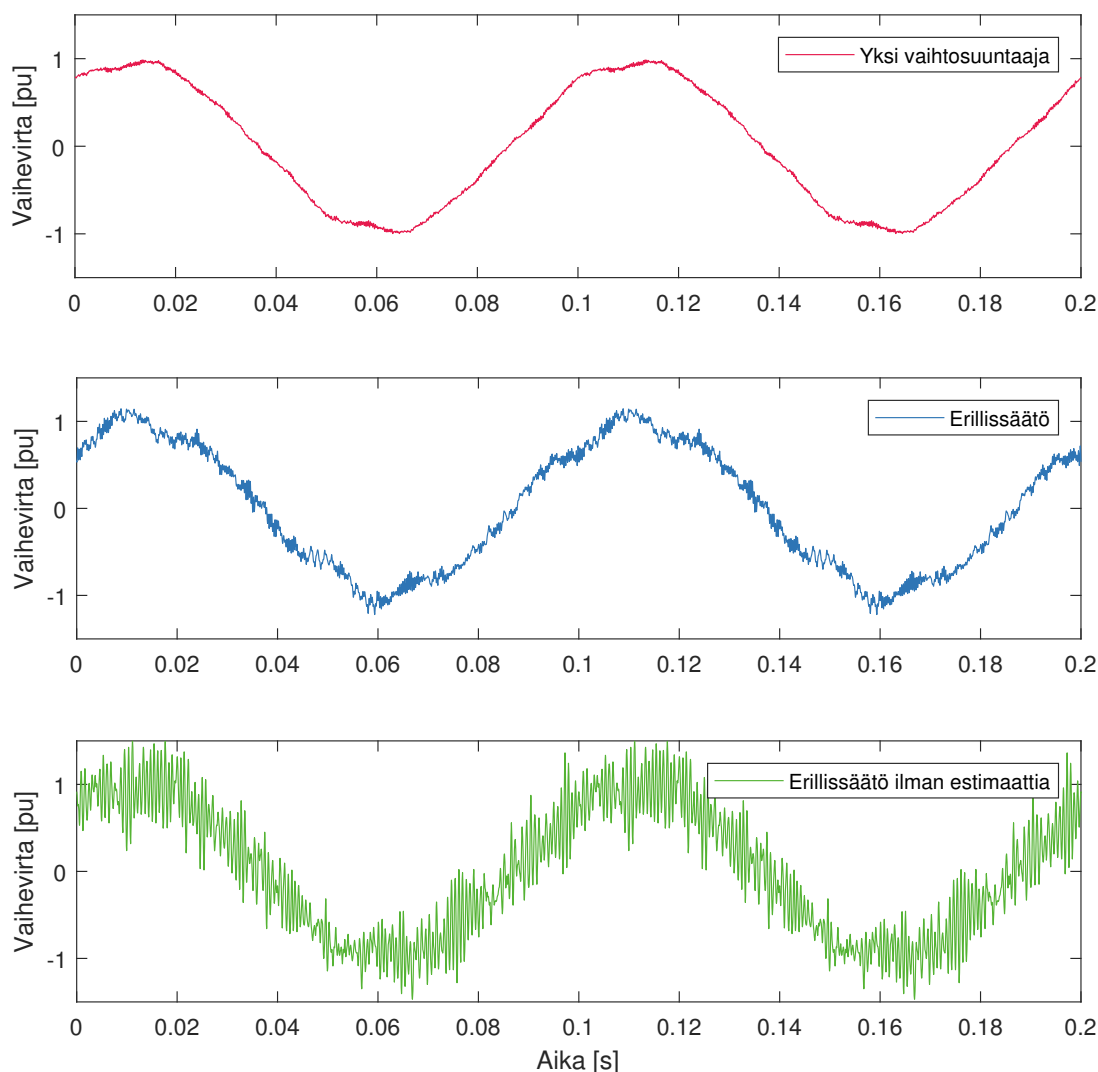
missä n on Nyquistin taajuutta vastaavan yliaallon järjestysluku ja I_h on järjestyslukua h vastaavan yliaallon amplitudi.

Kuvassa 29 on vaihevirran kokonaisharmoninen särö eri toimintapisteissä eri syöttötavoilla. Siniset pylväät kuvastavat virtaestimoidun erillissäädön viidennen ja seitsemännen yliaallon kokonaisharmonista säröä. Viivat esittävät kaikkien kyseisen ohjaustavan yliaaltojen säröä. Vaihevirtojen spektrit on esitetty kuvassa 30. Vasemmanpuoleisessa sarakkeessa on kuvattu 19 ensimmäistä järjestyslukua ja oikeinpuoleisessa sarakkeessa on yliaallot 3,5 kHz asti. Jokaisessa kuvassa asteikot ovat samat. Amplitudit ovat esitetty virran pu-arvoina. Perusaaltojen amplitudit ylittävät asteikon.

Virran kokonaisharmoninen särö erillissäädöllä on keskimäärin 1,6 kertaa korkeampi kuin yhdellä vaihtosuuntaajalla syötettynä. Merkittävimmät yliaallot ovat järjestysluvultaan viides ja seitsemäs. Nämä komponentit ovat huomattavasti korkeammat erillissäädöllä. Yhdellä taajuusmuuttajalla syötettynä puolet urista ovat virrattomia, joten matalainduktanssisia reittejä yliaalloille ei juurikaan synny. Kuvasta 29 huomataan, että erillissäädössä särö on merkittävästi riippuvainen koneen pyörimisnopeudesta. Matalilla nopeuksilla ($n = 0, 22$ pu) erillissäädön särö on 1,4



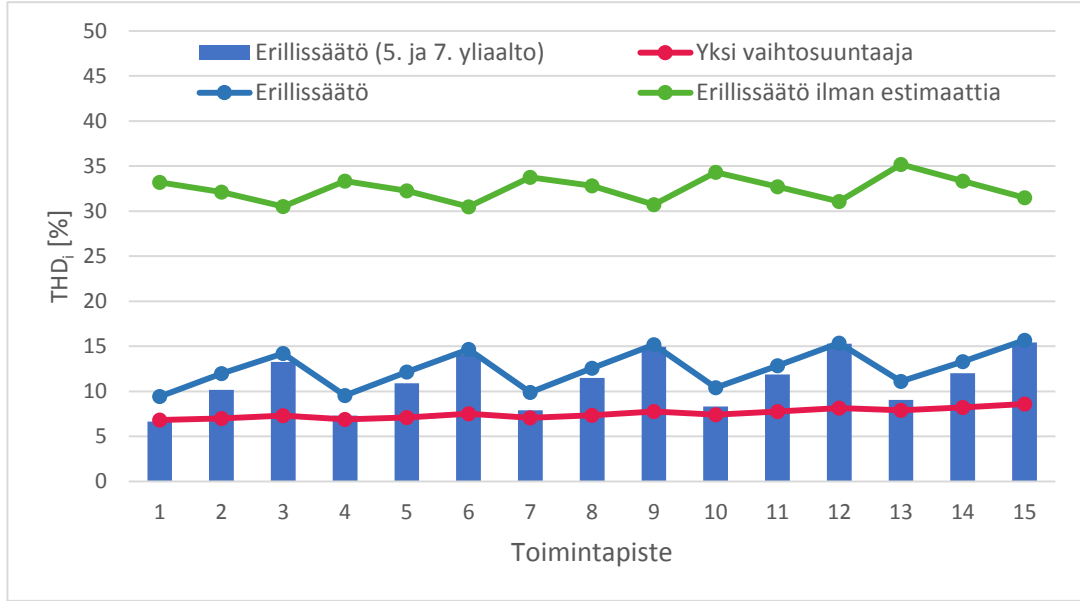
Kuva 27: Staattorin virtahäviöt kilowatteina.



Kuva 28: Vaihevirratt kun koneen pyörimisnopeus oli 0,33 pu ja vääntömomentti 0,80 pu.

kertaa korkeampi kuin yhdellä taajuusmuuttajan tapauksessa. Nopeudella $n = 0,45$ pu tämä suhde on 1,9. Nopeuden kasvaessa myös viidennen ja seitsemännen yliaallon osuus säröstä kasvaa. Voidaan todeta, että erillissäättö ei lisää matalan taajuuden yliaalloja, vaan ne aiheutuvat kaksikämmikoneen rakenteesta.

Ilman estimaattia erillissäädön kokonaisharmoninen särö on keskimäärin 4,3 kertaa korkeampi kuin yhdellä taajuusmuuttajalla syötettynä. Kuvasta 30 huomataan merkittävä yliaaltojen määrä erillissäädössä ilman virtaestimaattia. Taajuusmuuttajien toisilleen aiheuttamat yliaallot ovat erityisen korkeita taajuudella puolet kytkentätaajuudesta. Virtaestimaattia käytettäessä nämä korkean taajuuden yliaallot



Kuva 29: Vaihevirran kokonaisharmoninen särö eri toimintapisteissä.

poistuvat lähes kokonaan, johtuen taajuusmuuttajien tietämättömyydestä toisen taajuusmuuttajan indusoimista jännitteistä.

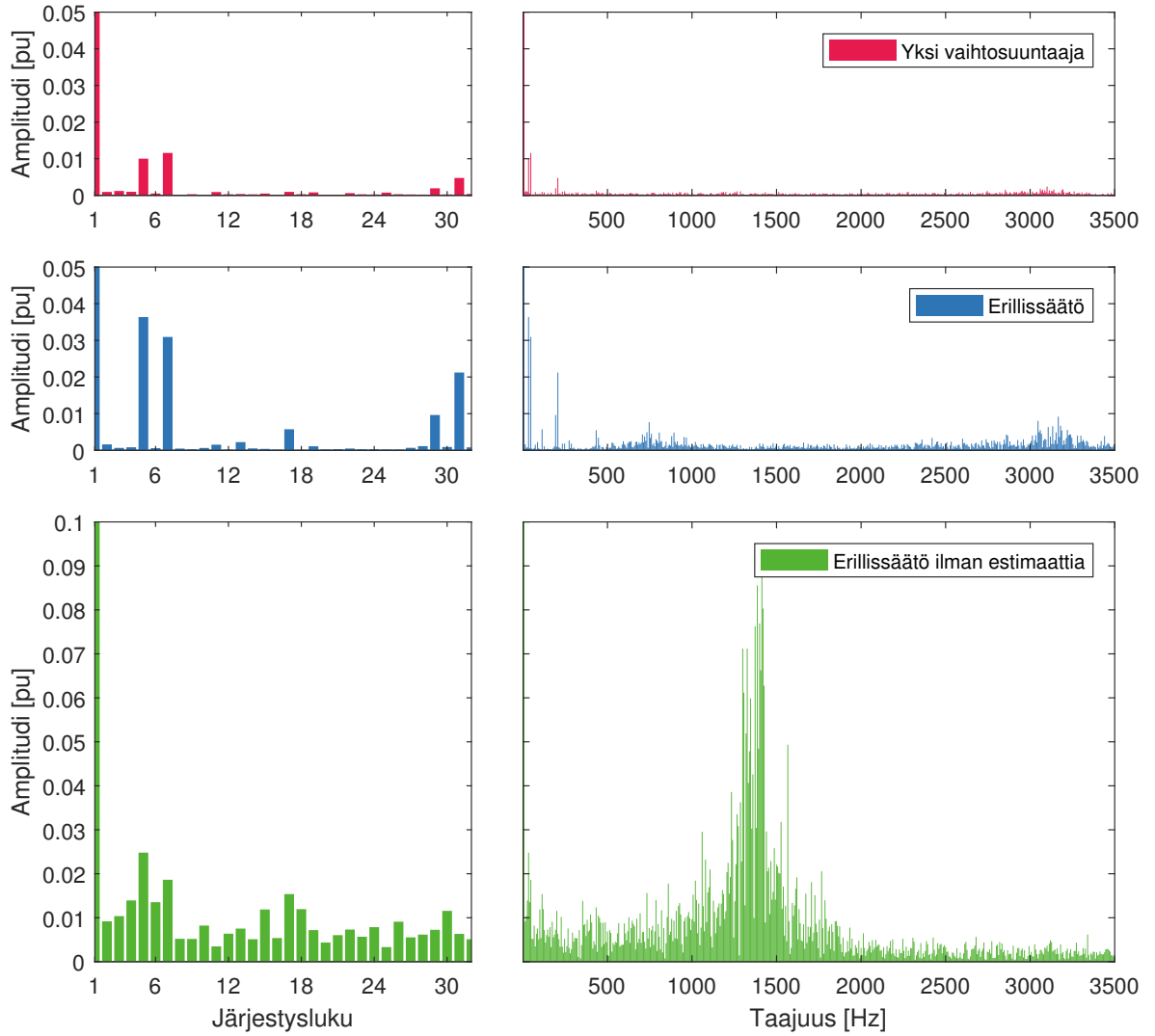
5.2.4 Jänteistykseen vaikutus yliaaltoihin

Kaksikäämikestomagneettitahtikoneen vastasähkömotorisen voiman (SMV) jännite mitattiin oskilloskoopilla kun roottoria pyöritettiin kuormakoneella nopeudella 0,33 pu. Jännitteen käyrämuoto on esitetty kuvassa 31 ja spektri kuvassa 32a. Staattorivirran viides ja seitsemäs yliaalto syntyvät vastasähkömotorisen voiman synnyttämistä vastaavista yliaalloista. Näiden yliaaltojen syntymiseen vaikuttaa roottorin avonapaisuus, urien muoto sekä kyllästymisen. Kaksikäämikoneet ovat herkkiä näille yliaalloille, sillä erillisten käämiryhmien vakoluku on pieni verrattuna kolmivaihekoneisiin. Tällöin käämitykset aiheuttavat kyseisiä yliaaltoja sillä käämityskerroimet näille yliaalloille ovat suuret. Vektoriavaruushajotelmalla näitä yliaaltoja voidaan kompensoida, mutta erillissäädöllä tai käyttämällä kaksikäämikoneen kaksiakselimallia niihin ei voida vaikuttaa.

Tietyn yliaallon käämityskerroin voidaan ilmoittaa vyöhykekertoimen ξ_{dv} , vinokertoimen ξ_{sqv} ja jännekertoimen ξ_{pv} tulona

$$\xi_{wv} = \xi_{dv} \cdot \xi_{sqv} \cdot \xi_{pv}, \quad (47)$$

missä v on yliaallon järjestysluku [18]. Käämityskerrointa pienentämällä voidaan tietyn yliaaltokomponentin amplitudia pienentää. Käämityskerroimia voidaan pienentää esimerkiksi lyhentämällä käämitysaskelta, eli jänteistyksellä. Jänteistykseen haittapuolena myös perusaallon amplitudi pienenee, tällöin koneen hyötysuhde kärsii. Jänteistys vaikuttaa jännekertoimeen, joka voidaan esittää jakomitan y ja napajaon



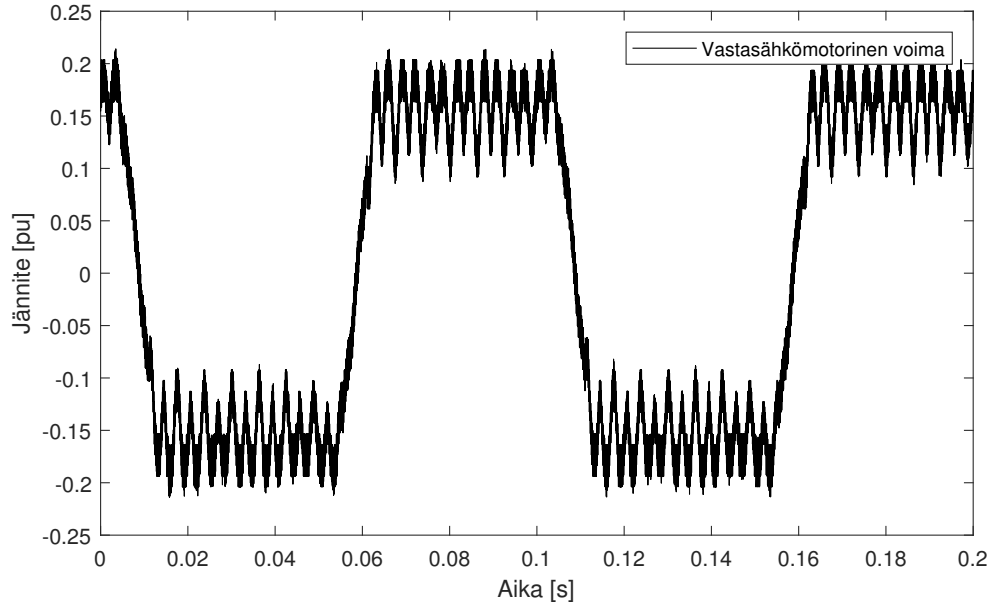
Kuva 30: Vaihevirran spektri kun pyörimisnopeus oli 0,22 pu ja vääntömomentti 0,20 pu.

y_Q avulla

$$\xi_{p\nu} = \sin\left(\nu \frac{y}{y_Q} \frac{\pi}{2}\right). \quad (48)$$

Jänteistämättömänä jakomitta vastaa napajakoa, $y = y_Q$. Jänteistykseen ollessa $5/6$, saadaan perusaallon sekä viidennen ja seitsemännen yliaallon jännekertoimiksi

$$\begin{cases} \xi_{p1} = \sin\left(1 \frac{5}{6} \frac{\pi}{2}\right) = 0,966 \\ \xi_{p5} = \sin\left(5 \frac{5}{6} \frac{\pi}{2}\right) = 0,259 \\ \xi_{p7} = \sin\left(7 \frac{5}{6} \frac{\pi}{2}\right) = 0,159. \end{cases} \quad (49)$$



Kuva 31: Kaksikäämikoneen vastasähkömotorisen voiman jännitemuoto kun pyörimisnopeus oli 0,33 pu.

Tällöin viides yliaalto pienenee noin neljäsosaan verrattuna täyden käämitysaskeleen tapaukseen, jossa $\xi_{pv} = 1$. Seitsemäs yliaalto pienenee noin kuudesosaan. Perusaallon tulisi pienentyä noin kolme prosenttia.

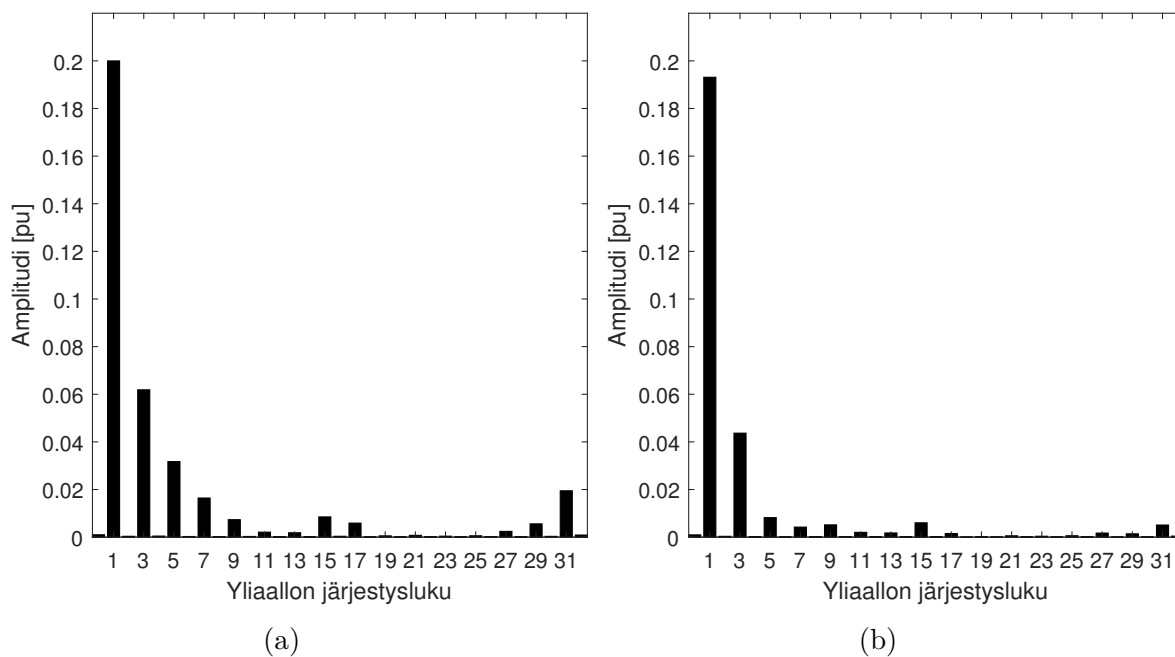
Jänteistyksen vaikutusta vastasähkömotoriseen voimaan simuloitiin mitatulla jännitedatalla. 5/6-jänteistys vastaa 30° vaihesiirtoa. Tällöin summaamalla 30° vaihesiirrolla olevat jännitekäyrät, saadaan jänteistyksen vaikutusta simuloitua. Kuvassa 32b on jänteistetyn vastasähkömotorisen voiman spektri. Huomataan selvä ero tietyissä yliaalloissa verrattuna kuvan 32a jänteistämättömään tapaukseen.

Taulukossa 9 on tarkemmin esitetty jänteistyksen vaikutusta vastasähkömotorisen voiman yliaaltoihin. Huomataan, että 5/6-jänteistys alentaa viidennen yliaallon amplitudia neljäsosaan. Tulos vastaa analyttistä laskua yhtälössä (49). Seitsemäs yliaalto pienenee myös neljäsosaan. Perusaallon amplitudi laskee kolme prosenttia. Yhtä lukuun ottamatta kaikki mitatut yliaallot pienenevät.

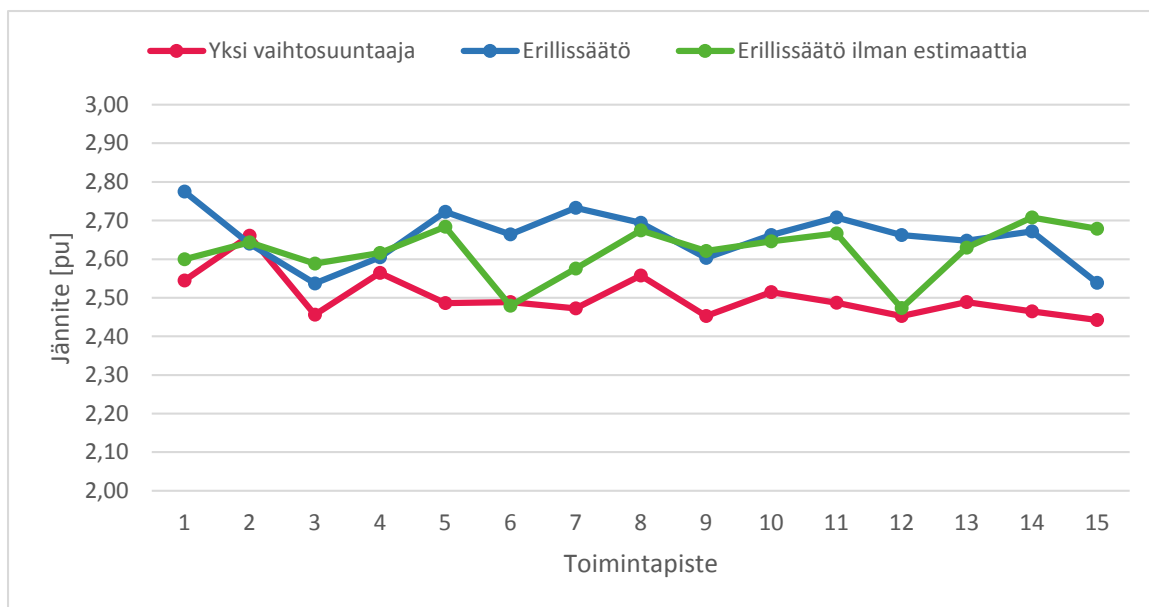
5.2.5 Jännitteet

Suuret jännitepiikit kuluttavat uran sekä vaiheiden välistä eristystä. Eristysten eliniikään vaikuttaa jännitepulssien suuruus ja esiintymistiheys [44]. Jännitteen nousuaika taas vaikuttaa käämikierrösten väliseen jänniterasitukseen.

Kuvassa 33 on mitattujen vaihejännitteiden huippuarvot eri toimintapisteissä. Huippuarvot on laskettu viiden korkeimman jännitepiikin keskiarvosta yhden sekunnin näytteenottoajalla. Erillissäädettyinä kaksikäämikoneen jännitepiikit olivat keskimäärin viisi prosenttia korkeampia kuin yhdellä vaihtosuuntaajalla. Virtaestimaatin käytössä ei näytä olevan vaikutusta jännitepiikkien korkeuteen. Kaksikäämikoneissa



Kuva 32: Kaksikäämikoneen vastasähkömotorisen voiman spektri a) jäniteistämättömänä ja b) 5/6-jäniteistyksellä, kun pyörimisnopeus oli 0,33 pu.



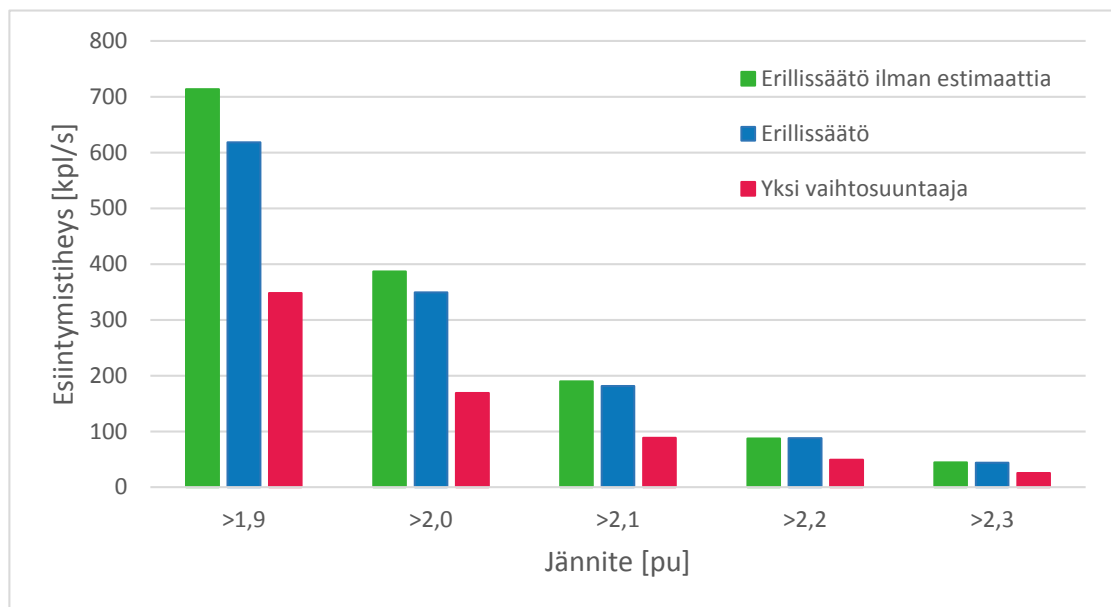
Kuva 33: Jännitepiikkien huippuarvot suhteelliarvoina.

käämiryhmät indusoivat toisiinsa keskinäisinduktanssin suuruuden mukaisen rippelijännitteen. Vain toista käämiryhmää syötettäessä tätä rippelijännitettä ei synny. Tämän takia yhdellä vaihtosuuntaajalla syötettynä jännitepiikit ovat pienemmät kuin erillissäädössä.

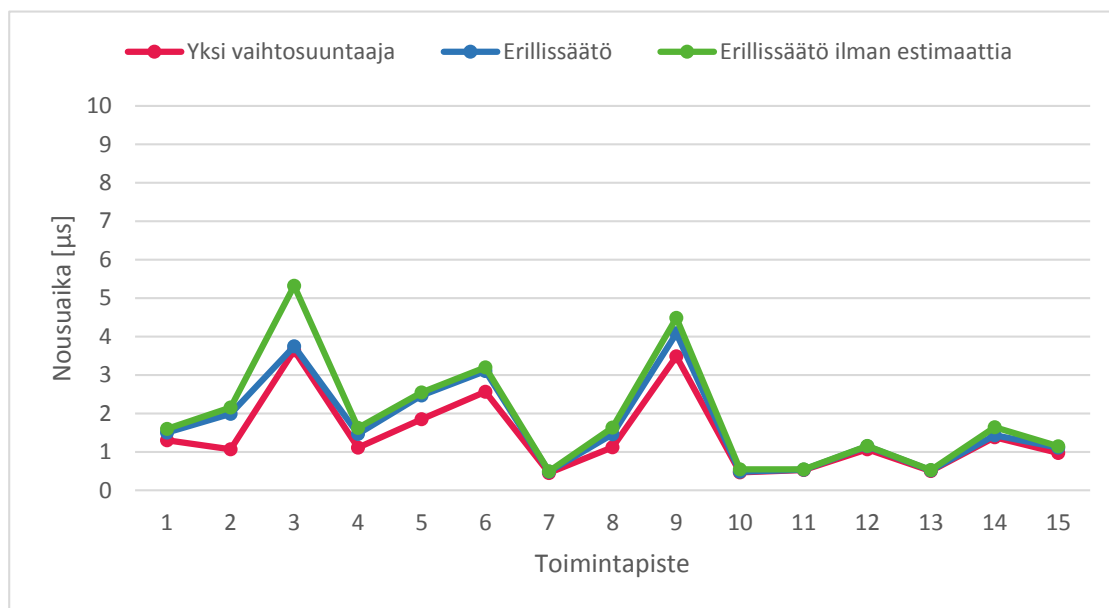
Taulukko 9: Vastasähkömotorisen voiman yliaaltojen amplitudit täydellä ja lyhennetyllä käämitysaskeleella.

Yliaallon järjestysluku	SMV [pu]	$SMV_{(5/6)}$ [pu]	$SMV_{(5/6)}/SMV$
1	0,2000	0,1931	0,966
3	0,0619	0,0437	0,706
5	0,0317	0,0082	0,258
7	0,0164	0,0042	0,257
9	0,0073	0,0052	0,702
11	0,0021	0,0020	0,966
13	0,0018	0,0018	0,958
15	0,0085	0,0060	0,707
17	0,0059	0,0015	0,257
19	0,0005	0,0001	0,256
21	0,0008	0,0006	0,731
23	0,0004	0,0004	0,937
25	0,0006	0,0006	1,033
27	0,0024	0,0017	0,706
29	0,0056	0,0014	0,248
31	0,0195	0,0051	0,261

Kuvassa 34 on jännitteen vertailuarvojen (1,9-2,3 pu) ylittävien jännitepiikkien lukumäärä toimintapisteiden keskiarvona. Erillissäädöllä käyttäen estimaattia keskimäärin 88 % korkeampi jännitepiikkien lukumäärä kuin yhdellä vaihtosuuntaajalla. Ilman estimaattia sama arvo on 100 %. Virtaestimaatilla ei ole vaikutusta jännitepiikkien huippuarvoon, mutta se vaikuttaa korkeiden jännitepiikkien esiintymistiheyteen.



Kuva 34: Jännitteen vertailuarvon ylittävien jännitepiikkien lukumäärä yhden sekunnin aikana toimintapisteiden keskiarvona.



Kuva 35: Jännitteiden lyhyimmät nousuajat eri toimintapisteissä.

Virran estimointi vähentää ylimääräisten kytkentöjen määrää huomattavasti verrattuna erillissäätöön mitatulla virralla. Tällöin myös käännyhmien välinen indusoitunut jänniterippeli on pienempi.

Jännitteiden nousuajat on laskettu pu-arvon 1 ylittävistä jännitepiikeistä. Nousuaika on aika joka kestää jännitteen nousun arvosta 10 % arvoon 90 % suhteutettuna kyseisen jännitepiikin huippuarvoon. Kuvassa 35 on esitetty mitattujen vaihejännitteiden viiden lyhimmän nousuajan keskiarvot eri toimintapisteissä. Huomataan, että koneen ohjaustavalla ei ole merkitystä. Nousuajat ovat täysin riippuvaiset vaihtosuuntaajan ja koneen ominaisuuksista, eikä erillissäätö lyhennä niitä.

5.2.6 Laakerivirrat

Taajuusmuuttajien aiheuttamat laakerivirrat ovat yleinen syy laakereiden vioittumiselle [41]. Taajuusmuuttajien aiheuttamat laakerivirrat syntyvät korkeataajuisesta yhteismuotoisesta jännitteestä [41]. Tässä työssä ei laakerivirtoja mitattu, johtuen lähellä olevasta etumuuntajasta. Etumuuntaja estää suurien yhteismuotoisten virtojen syntymisen. Tästä johtuen myös laakerivirrat jäävät pieneksi. Erillissäädön vaikutus laakerivirtoihin rajataan siten tämän työn ulkopuolelle.

6 Yhteenveto

Redundanttisella monivaihekonekäytöllä voidaan esimerkiksi laivoissa lisätä propulsiojärjestelmien viansietokykyä. Kaksikäämikone on kuusivaiheinen monivaihekone, jossa on kaksi kolmivaihekäämiryhmää, jotka on galvaanisesti erotettu toisistaan. Käämiryhmien välisen magneettisen kytkeytymisen seurauksena käämiryhmät indusoivat toisiinsa jännitteen. Tämä jännite tulee huomioida ohjauksessa, jotta säätö toimii oikein. Tässä työssä esitettiin kolme kaksikäämikoneen mallinnustapaa, joiden avulla mallipohjainen säätö voidaan toteuttaa.

Perinteisesti säätö on toteutettu kaksikäämikoneen kaksiakselimallin pohjalta. Ohjaus on toteutettu kahdella ohjauskortilla ja taajuusmuuttajalla. Käämien virtatiedot jaetaan ohjauskorttien kesken. Tällöin vaihtosuuntaajat osaavat ottaa huomioon toisen käämiryhmän indusoimat jännitteen ja erottaa ne syöttämistään jännitteistä. Tällöin säädöt toimivat eikä ylimääräisiä yliaaltoja synny. Toinen mallinnustapa on vektoriavaruushajotelma, joka esittää sopivalla muunnosmatriisilla vääntömomenttia luovat ja yliaaltoja aiheuttavat virtakomponentit erillisillä aliavaruuksilla. Tällöin momenttisäätö yksinkertaistuu kaksikäämikoneen kaksiakselimalliin verrattuna ja tiettyjä yliaaltoja voidaan kompensoida pois. Hajotelman käyttö vaatii yhteisen ohjauksen koko koneelle ja se on monimutkainen toteuttaa [10, 11].

Kolmas vaihtoehto on tässä työssä esitetty virtaestimoitu erillissäätö. Yleensä erillissäätö on toteutettu käyttäen mitattua virtaa säädössä. Kaksikäämikoneen mitattu staattorivirta sisältää sekä käämiin syötetyn jännitteen synnyttämän virran että toisesta käämiryhmästä indusoituneen rippelivirran. Erillissäädetyt vaihtosuuntaajat eivät erottele syötettyjä virtoja ja indusoituneita rippelivirtoja toisistaan. Tällöin vaihtosuuntaajat reagoivat toistensa kytkeäntöihin ja aiheuttavat korkeataajuisia yliaaltoja. Nämä yliaallot kiertävät staattorin hajainduktanssien kautta taajuusmuuttajien välillä ja aiheuttavat lisähäviöitä. Tässä työssä käytettiin virtaestimaattia mitatun virran sijaan. Tällöin taajuusmuuttajat näkevät vain syöttämänsä jännitteen aiheuttaman virran eivätkä huomaa toisen käämiryhmän yliaaltoja. Tällöin säätöjen välillä ei ole kytkeytymistä, joten säädöt toimivat eikä ylimääräisiä yliaaltoja synny.

Työn tavoitteena oli osoittaa erillissäädön toimivuus ja käytettävyys. Tavoitteena oli vahvistaa erillissäädön toimivuus osoittamalla mittauksin, ettei virtaestimoitu erillissäätö aiheuta vääntömomenttirippeliä, ylimääräisiä staattorivirran yliaaltoja eikä ylimääräisiä jännitepiikkejä. Tämän lisäksi erillissäädön käytettävyys vahvistettiin vertaamalla sitä muihin esitettyihin ohjaustapoihin. Lisäksi vielä mitattiin kaksikäämikoneen vaihesiirron vaikutusta koneen induktansseihin sekä simuloitiin jäniteistyyksen vaikutusta staattorivirran yliaaltoihin. Erillissäädöstä saadut tulokset vastasivat hyvin optimistisimpia odotuksia, eikä pelättyjä sivuvaikutuksia löydetty. Kaksikäämikoneen rakenteesta ei kuitenkaan löydetty vaihtoehtoa, jolla sekä käämiryhmien välinen magneettinen kytkeytyminen että virran matalan taajuuden yliaallot olisivat pienimmillään. Kaksikäämikoneen kohdalla joudutaan siis tekemään aina kompromissi jommankumman ominaisuuden suhteen.

Taulukossa 10 on esitetty eri tavoilla toteutetun kaksikäämikoneen ohjauksen hyötyjä sekä haittoja. Taulukon mukaan dynamiikka on kaksikäämikoneen kaksiakselimalliin perustuvan säädön ainoa etu verrattuna virtaestimoituun erillissäätöön.

Ero on kuitenkin pieni, sillä jännitemallia käyttävän virtaestimoidun erillissäädön dynamiikka heikkenee ainoastaan matalilla nopeuksilla. Suurilla nopeuksilla dynamiikka on lähes yhtä hyvä kuin kaksikäämikoneen kaksiakselimalliin perustuvalla säädöllä. Suurilla nopeuksilla ainoa virhe syntyy virtaestimaatin epätarkkuudesta. DTC-erillissäädössä virtamalli heikentää säädön dynamiikkaa matalilla nopeuksilla johtuen käämiryhmien ristikkäistä kytkeytymistä kuvaavien termien puuttumisesta. Termien puuttumisesta johtuvan virheen suuruus on suoraan riippuvainen koneen pitkittäis- sekä poikittaissuuntaisten magnetointi-induktanssien välisestä erosta yhtälön (22) mukaan. Virheen suuruus on kuitenkin usein suhteellisen pieni ja dynamiikka on riittävä moniin sovelluksiin [32]. Kaksikäämikoneen kaksiakselimalliin perustuvan säädön selkeitä heikkouksia verrattuna erillissäätön ovat moottorimallin sekä järjestelmän monimutkaisuus. Ristikkäiskytketymisen ehkäiseminen vaatii sekä fyysisiä linkkejä ohjauskorttien välille että ohjelmistotason muutoksia tavallisen kolmivaihekoneen säätöön.

Taulukko 10: Kaksikäämikoneen ohjaustapojen vertailu.

Ominaisuus	Erillissäätö	Kaksikäämikoneen kaksiakselimalliin perustuva säätö	Vektoriavaruushajotelmaan perustuva säätö
5. ja 7. virran yliaalto	-	-	+
Virtatasapaino	+	+	$+(-)$
Dynamiikka	-	+	+
Redundanttisuus	+	+	-
Järjestelmän yksinkertaisuus	+	-	-
Moottorimallin yksinkertaisuus	+	-	+

Vektoriavaruushajotelmaa käytettäessä kaksikoneen säädössä pystytään koneen itsensä aiheuttamia matalan taajuuden yliaaltoja kompensoimaan. Tämä pienentää koneen lämpenemistä ja on huomattava etu verrattuna muihin ehdotettuihin mallinustapoihin. Käytettäessä hajotelman kanssa kuusivaiheista vaihtosuuntaajaa, säilyy virtatasapaino käämiryhmien välillä, mutta kahdella kolmivaiheisella vaihtosuuntaajalla joudutaan virtatasapaino ottamaan huomioon säädössä [39]. Hajotelman käyttö edellyttää koko kaksikäämikonekäytön toimimista, joten käyttö ei ole redundantti. Jos kaksikäämikonetta syötetään kahdella vaihtosuuntaajalla, tulee ohjaustapoja olla kaksi, jotta toisen taajuusmuuttajan tai verkon vikaantuessa konetta pystytään vielä pyörittämään [33]. Hajotelmaa käytettäessä moottorimalli vastaa kolmivaihekoneen mallia, mutta suuren muunnosmatriisin ratkaiseminen on raskasta ja vaatii paljon

laskenta-aikaa [33]. Standardisoitujen ratkaisujen puutteesta sekä edellä mainituista heikkouksista johtuen vektoriavaruushajotelman käyttö vaikeuttaa järjestelmän käyttöönottoa [10, 32, 33].

Erillissäädön yksinkertaisuus tekee siitä varteenotettavan vaihtoehdon kaksikämmikoneen ohjauksessa. Kahdella erillissäädetyllä kolmivaiheisella taajuusmuuttajalla saavutetaan kaksikämmikoneen virtatasapaino sekä käytön täysi redundanttisuus. Käyttöönotto ei vaadi mitään ylimääräistä verrattuna kolmivaihekonekäytön käyttöönottoon. Virran estimoinnilla voidaan poistaa säätöjen ristikkäiskytketyminen ilman, että virtatietoja jaetaan säätöjen kesken. Virtaestimoidulla erillissäädöllä vaihtosuuntaajat eivät huomaa kytkeytymisen kautta indusoituneita jännitteitä. Tällöin säätöjen välillä ei ole kytkeytymistä, joten säädöt toimivat eikä ylimääräisiä yliaaltoja synny. Virtaestimoidun erillissäädön dynamiikka kärsii vain matalilla nopeuksilla ja siten soveltuu hyvin esimerkiksi propulsiokäyttöihin, jotka eivät vaadi hyvää dynamiikkaa alhaisilla nopeuksilla.

Laboratoriomittauksilla huomattiin, että erillissäätö ei kasvata staattorin jännitepiikkien huippuarvoja eikä lyhennä niiden nousuaikaa. Ilman virran estimointia huomataan kuitenkin selkeä kasvu jännitepiikkien esiintymistiheydessä. Tämä johtuu säätöjen ristikkäiskytketyksestä, jolloin käämiryhmien välillä indusoituneet jännitteet aiheuttavat ylimääräisiä vaihtosuuntaajien kytkentöjä. Tällöin myös jännitepiikkien määrä lisääntyy. Virtaestimaattia käytettäessä erillisten säätöjen ristikkäiskytketyminen häviää, eivätkä vaihtosuuntaajat tee ylimääräisiä kytkentöjä. Virtaestimoitu erillissäätö ei siten lisää jännitepiikkien määrää. Virtaestimoitu erillissäätö ei myöskään aiheuta vääntömomenttirippeliä eikä lisää staattorivirran yliaaltoja. Sillä ei kuitenkaan voida kompensoida koneen itsensä aiheuttamia matalan taaajuuden yliaaltoja, jotka lämmittävät konetta. Suurin osa erillissäädön virtahäviöistä johtuvat näistä yliaalloista. Kyseisiä yliaaltoja voidaan kompensoida koneen jäniteistyksellä, mutta tällöin törmätään muihin ongelmiin.

Taulukossa 11 on esitetty eri kytkentöjen hyötyjä ja haittoja. Plusmerkillä (+) on merkitty kunkin kytkennän hyödyt muihin kytkentöihin verrattuna. Miinusmerkki (-) tarkoittaa kytkennän olevan keskiarvoa huonompi ja yhtäsuuruusmerkki (=) tarkoittaa kytkennän olevan keskiarvoinen. Parhaimmat vaihtoehdot ovat taulukon mukaan 30° vaihesiirto jäniteistämättömänä (YY30) sekä 0° vaihesiirto (YY0) jäniteistettynä. 30° vaihesiirrolla varmistetaan järjestysluvun kuusi vääntömomenttirippelin poissao- lo. Jäniteistämättömällä 30° vaihesiirrolla käämiryhmien välinen keskinäisinduktanssi on pienimmillään ja kytkentätaajuisia yliaaltoja rajoittava staattorin hajainduktanssi suurimmillaan. Tällöin käämiryhmien välinen magneettinen kytkeytyminen on pienimmillään ja kaksikämmikone on mahdollisimman redundantti. Haittapuolena jäniteistämättömällä 30° vaihesiirrolla on korkeat koneen sisäiset viides ja seitsemäs yliaalto, jotka lisäävät koneen virtahäviöitä. Jäniteistetyllä 0° vaihesiirrolla saadaan poistettua viides ja seitsemäs yliaalto. Kuitenkin sillä menetyksellä, että kuudes vääntömomenttirippeli ei kumoudu kuten 30° vaihesiirrolla. Tämä vääntömomenttirippeli voidaan kuitenkin olettaa pieneksi, johtuen jäniteistyksen alentavasta vaikutuksesta kyseisen yliaallon virtakomponentteihin. Jäniteistetyllä 0° vaihesiirrolla on hieman korkeampi keskinäisinduktanssin arvo sekä pienempi staattorin hajainduktanssin arvo kuin jäniteistämättömällä 30° vaihesiirrolla.

Taulukko 11: Kaksikäämikoneen ominaisuuksien vertailu.

Ominaisuus	YY30 Jänteis- tämätön	YY30 5/6- jänteistys	YY0 Jänteis- tämätön	YY0 5/6- jänteistys
5. ja 7. virran yliaalto	-	+	-	+
6. vääntömomentin yliaalto	+	+	-	-
Keskinäisinduk- tanssin suuruus	+	-	-	=
Staattorin hajain- duktanssin suuruus	+	-	-	=

Yksinkertaisin ja edullisin kaksikäämikoneen ohjaustapa - virtaestimoitu erillissäätö - on varteenotettava vaihtoehto esimerkiksi propulsiokäyttöihin, joilta ei vaadita korkeaa dynamiikkaa matalilla nopeuksilla. Paras kaksikäämikonetyyppi erillissäädölle lienee 30° vaihesiirto ilman jänteistystä. Jänteistyksellä saataisiin matalan taajuuden korkeita yliaaltoja pienennettyä, mutta tällöin käämiryhmien välinen magneettinen kytkeytyminen voimistuisi. Nämä yliaallot tulee huomioida huolellisella koneensuunnittelulla ja -mitoituksella.

Tässä työssä tehty tarkastelu kaksikäämikoneista sekä niiden erillissäädöstä oli pintaraapaisu ja jatkotutkimus on tarpeen. Jatkossa voidaan jokaista osa-aluetta tarkastella ja kehittää erikseen. Erityisesti olisi hyvä tutkia tarkemmin konetyyppejä ja -rakennetta, joka parhaiten sopii erillissäätöön. Myös virtaestimoidun DTC-erillissäädön dynamiikkaa matalilla nopeuksilla tulisi tarkastella ja tutkia miten sitä voitaisiin parantaa. Yksi vaihtoehto tähän on induktanssiparametrien korjaus virtamallissa. Aihetta voidaan laajentaa tutkimalla erillissäädön käytettävyyttä esimerkiksi monivaihekoneilla, joissa on kolmivaihekäämitysten monikertoja enemmän kuin kaksi.

Viitteet

- [1] International Guidelines for The Safe Operation of Dynamically Positioned Offshore Supply Vessels. (2015). [online] London: IMC A. Available at: <http://www.amcsearch.com.au/wp-content/uploads/IMCA-182-International-Guidelines-for-The-Safety-Operation-of-DP-Offshore-Supply-Vessels1.pdf> [Accessed 1 Oct. 2017].
- [2] Ward, E.E. & Harer, H. Preliminary investigation of an inverter fed five phase induction motor. *Proc. IEE 116 (6)*, 1969, s. 980–984.
- [3] Nanoty, A. & Chudasama, A. R. Control of designed developed six phase induction motor. *International Journal of Electromagnetics and Applications*, 2012, vol. 2, nro 5, s. 77–84.
- [4] Singh, G. K. Multiphase induction machine drive research — A survey. *Electric Power Systems Research*, 2002, vol. 61, nro 2, s. 139–147.
- [5] Levi, E., Bojoi, R., Profumo, F., Toliyat, H. A., & Williamson, S. Multiphase induction motor drives – a technology status review. *IET Electric Power Applications*, 2007, vol. 1, nro 4, s. 489–516.
- [6] Bojoi, R. Farina, F. Griva, G. & Profumo, F. Direct torque control for dual three-phase induction motor drives. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2005, vol. 41, s. 1627–1636.
- [7] Tessarolo, A. Modeling and analysis of multiphase electric machines for high-power applications. Ph.D. Thesis, The University of Trieste, Trieste, Italy, 2011.
- [8] Hadiouche, D., Razik, H., & Rezzoug, A. On the modeling and design of dual-stator windings to minimize circulating harmonic currents for VSI fed AC machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, vol. 40, nro 2, s. 506–515.
- [9] Burzanowska, H., Schroderus, P., Stulz, C., Lehti, M., & Kaukonen, J. Novel concept for full redundant drive with direct torque control (DTC) and dual-star synchronous machine. *Electr. Eng. Res. Rep.*, 2005, nro 20, s. 24–32.
- [10] Zhao, Y., & Lipo, T. A. Space vector PWM control of dual three-phase induction machine using vector space decomposition. *IEEE Transactions on industry applications*, 1995, vol. 31, nro 5, s. 1100–1109.
- [11] Bojoi, R., Farina, F., Profumo, F., & Tenconi, A. Dual-three phase induction machine drives control—A survey. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2006, vol. 42, nro 4, s. 420–429.
- [12] Lipo, T. A. A dq model for six p induction machines. *Proc. Int. conf. Electrical machines*. 1980, s. 860–867.

- [13] Westerlund, J. 2015. YY0 mutual inductance of induction generator. ABB Oy, Helsinki. Sisäinen raportti. 9 s.
- [14] Westerlund, J. 2015. YY30 mutual inductance of induction generator. ABB Oy, Helsinki. Sisäinen raportti. 7 s.
- [15] Bojoi, R., Lazzari, M., Profumo, F., & Tenconi, A. Digital field-oriented control for dual three-phase induction motor drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, nro 3, s. 752–760.
- [16] Kanerva, S., Toivanen, O., Sario, P., & Arshad, W. Experimental study on harmonic losses of a dual-stator synchronous motor with redundant voltage source inverter (VSI) drive. *In Proc. 18th Int. Electrical Machines Conf. ICEM 2008*, s. 1–4.
- [17] Abuishmais, I., Arshad, W. M., & Kanerva, S. Analysis of VSI-DTC fed 6-phase synchronous machines. *in 13th Power Electronics and Motion Control Conf. 2008 (EPE-PEMC)*, 2008, s. 867—873.
- [18] Pyrhönen, J., Jokinen, T. & Hrabovcova, V. *Design of rotating electrical machines*. 1. painos. John Wiley & Sons, 2013.
- [19] Luomi, J. & Niemenmaa, A. Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt. Kurssin S-17.2020 luentomoniste. Espoo, 2007.
- [20] Krause, P., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. *Analysis of electric machinery and drive systems*. 75. painos. New York, John Wiley & Sons. 2013.
- [21] Kallio, S. Modeling and parameter estimation of double-star permanent magnet synchronous machines. Ph.D. Thesis, Acta Universitatis Lappeenrantaensis. 2014.
- [22] Jiang, X., Huang, W., Cao, R., Hao, Z., Jiang, W. & Kanerva, S. Electric drive system of dual-winding fault-tolerant permanent-magnet motor for aerospace applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, s. 7322–7330.
- [23] Liwshitz-Garik, M. & Whipple, C. C. *Electric Machinery Vol. I: Fundamentals and DC Machines*. 3.painos. D. Van Nostrand Company, Inc. USA, 1947.
- [24] Liwshitz-Garik, M. & Whipple, C. C. *Electric Machinery Vol. II: AC Machines*. 5.painos. D. Van Nostrand Company, Inc. USA, 1950.
- [25] Hsieh, M.F., Hsu, Y.C., Dorrell, D.G., and Hu, K.H. Investigation on End Winding Inductance in Motor Stator Windings. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, vol. 43, nro 6, s. 2513—2515.
- [26] Niiranen, J. 2001. Equivalent circuit and per unit system for a 2 x 3 phase 30° synchronous machine. ABB Corporate Research Oy, Helsinki. Tutkimusraportti. 10 s.

- [27] Park, R. H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1929, vol. 48, nro 3, s. 716–727.
- [28] Burzanowska, H., Sario, P., Stulz, Ch. & Joerg, P. Redundant Drive with Direct Torque Control (DTC) and Dual-Star Synchronous Machine, Simulations and Verification *European Conf. Power Electronics and Applications (EPE)*, 2007, s. 1–10.
- [29] Nelson, R. H., & Krause, P. C. Induction machine analysis for arbitrary displacement between multiple winding sets. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1974, nro 3, s. 841–848.
- [30] Kallio, S., Andriollo, M., Tortella, A., and Karttunen, J. Decoupled d-q Model of Double- Star Interior Permanent Magnet Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, vol. 60, nro 6, s. 2486–2494.
- [31] Zaimeddine, R., & Undeland, T. Direct torque control scheme for dual-three-phase induction motor. *In Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International*, s. 3007–3014.
- [32] Karttunen, J., Kallio, S., Peltoniemi, P., Silventoinen, P., & Pyrhönen, O. Dual three-p permanent magnet synchronous machine supplied by two independent U source inverters. *In Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium*, 2012, s. 741–747.
- [33] Singh, G. K., Nam, K., & Lim, S. K. A simple indirect field-oriented control scheme for multiphase induction machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, vol. 52, nro 4, s. 1177–1184.
- [34] Hu, Y., Zhu, Z. Q., & Odavic, M. Comparison of two-individual current control and vector space decomposition control for dual three-phase PMSM. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, vol. 53, nro 5, s. 4483–4492.
- [35] Yepes, A. G., Malvar, J., Vidal, A., López, O., & Doval-Gandoy, J. Optimized harmonic current control strategy for nonlinearities compensation in multiphase ac drives. *In Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2013, s. 1458–1464.
- [36] Shyu, K. K., Shang, L. J., Chen, H. Z., & Jwo, K. W. Flux compensated direct torque control of induction motor drives for low speed operation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, vol. 19, nro 6, s. 1608–1613.
- [37] Kaukonen, J. Salient pole synchronous machine modelling in an industrial direct torque controlled drive application. Ph.D. Thesis, Acta Universitatis Lappeenrantaensis. 1999.
- [38] Schroderus, P., & Heikkilä, S. (2001). U.S. Patent No. 6,195,274. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

- [39] Bojoi, R., Farina, F., Lazzari, M., Profumo, F., & Tenconi, A. Analysis of the asymmetrical operation of dual three-phase induction machines. *In Electric Machines and Drives Conference. IEMDC'03. IEEE International*, 2003, vol. 1, s. 429–435.
- [40] Lyra, R. O., & Lipo, T. A. Torque density improvement in a six-phase induction motor with third harmonic current injection. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, vol. 38, nro 5, s. 1351–1360.
- [41] Särkimäki, V. Radio frequency measurement method for detecting bearing currents in induction motors. Ph.D. Thesis, Acta Universitatis Lappeenrantaensis. 2009.
- [42] Harnefors, L., Hinkkanen, M., Wallmark, O., & Yepes, A. G. Control of Voltage-Source Converters and Variable-Speed Drives. Luentomoniste. 2015.
- [43] Melfi, M. J. Quantifying the energy efficiency of motors on inverters. *IEEE Industry Applications Magazine* 2011, vol. 17, nro 6 s. 860–867.
- [44] Hudon, C., Amyot, N., Lebey, T., Castelan, P., & Kandev, N. Testing of low-voltage motor turn insulation intended for pulse-width modulated applications. *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*, 2000, vol. 7, nro 6, s. 783—789.